



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**“ESTUDIO DE SISTEMAS DE CONTROL
SEMIACTIVO EN ESTRUCTURAS ACOPLADAS”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PRESENTADA POR:

ING. LUIS BERNARDO UGARTE LUCUY

DIRECTOR DE TESIS: DR. MANUEL E. RUIZ-SANDÓVAL HERNÁNDEZ

MÉXICO D.F., JULIO DE 2011

RESUMEN

L. Bernardo Ugarte Lucuy

Los eventos naturales extraordinarios que han afectado a la sociedad las últimas décadas, han superado cualquier expectativa sospechada, cobrando la vida de miles de personas en las zonas urbanas y ocasionando incalculables pérdidas económicas.

La mirada de los ingenieros se vuelca a estos acontecimientos. La prioridad es buscar nuevas herramientas y soluciones, para mitigar o reducir el impacto de estos efectos sobre las estructuras.

En los últimos años, los sistemas de control estructural han cobrado mucha importancia dentro del campo de la ingeniería estructural. Estos sistemas han demostrado ser una alternativa atractiva para la protección de las construcciones civiles ante demandas accidentales como sismos. Por ello, se pretende realizar un estudio sobre sistemas de control, en particular dispositivos semiactivos, que sin duda, son una de las alternativas más viables desde el punto de vista económico y de confiabilidad.

Uno de los métodos para el uso de estas estrategias de control, es el acoplamiento de edificios con estos dispositivos. La idea es aprovechar el control que pueda ejercer una estructura sobre la otra y de esta manera realizar un algoritmo que minimice las respuestas de ambos edificios.

En el presente estudio se muestra un resumen sobre los diferentes sistemas de control, sus características y sus aplicaciones en la actualidad. También se realiza un análisis sobre estructuras acopladas, sus ventajas, y como éstas pueden comportarse con un dispositivo de control como elemento de conexión.

Se someten las estructuras a diferentes excitaciones de terreno, y se aplican varias alternativas de control como elemento de acoplamiento. Se realiza una comparación de resultados y selección de las mejores alternativas que resulten en una reducción importante de las respuestas.

Se realizan conclusiones de acuerdo a los resultados y recomiendan estudios futuros para su aplicación en estructuras reales.

*Dedicado a mi abuela Elena, que desde el cielo
es mi inspiración y coraje para alcanzar logros
como este y seguir adelante hacia muchos más.*

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	vi
 CAPÍTULO 1. - INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Revisión de la literatura	5
1.3 Problemática	8
1.4 Objetivo general	9
1.5 Objetivos específicos	9
1.6 Resumen de la investigación	10
 CAPÍTULO 2. - SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL	
2.1 Generalidades	12
2.1.1 Concepto	13
2.2 Tipos de control estructural	13
2.2.1 Sistemas de control pasivo	14
2.2.1.1 Osciladores de masa resonante	14
2.2.1.2 Disipadores de energía	16
2.2.1.3 Aisladores de base	20
2.2.2 Sistemas de control activo	21
2.2.3 Sistemas de control semiactivo	24
2.2.3.1 Amortiguadores de orificio variable	24
2.2.3.2 Osciladores de masa resonantes inteligentes	25
2.2.3.3 Amortiguadores de fricción variable	25
2.2.3.4 Amortiguadores con fluidos controlables	26
 CAPÍTULO 3. - ESTUDIO DE ESTRUCTURAS ACOPLADAS	
3.1 Generalidades sobre estructuras acopladas	29
3.2 Modelos de edificios de 2 grados de libertad	30
3.3 Modelos analíticos de estudio	36
3.4 Estudios dinámicos de cada estructura (3 y 9 niveles)	38

CAPÍTULO 4. - SISTEMAS DE CONTROL EN ESTRUCTURAS ACOPLADAS

4.1	Introducción	44
4.2	Sistemas de edificios acoplados	45
4.3	Ubicación óptima del dispositivo de control	48
4.4	Número de dispositivos de control adecuados	55
4.5	Formas modales complejas	62
4.6	Comentarios relevantes	68

CAPÍTULO 5. - UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO Y SEMIACTIVO EN ESTRUCTURAS ACOPLADAS

5.1	Introducción	69
5.2	Teoría de control sistemas activos	70
5.2.1	Algoritmos de control	71
5.2.2	Sistemas de control semiactivo y fuerzas de control	73
5.3	Excitaciones del terreno	74
5.4	Modelos de edificios acoplados	75
5.5	Modelos de edificios acoplados con un dispositivo de control	75
5.5.1	Fuerzas de control efectivas (1 actuador)	81
5.5.2	Disipación de energía y comando de fuerza	82
5.5.3	Distorsiones de entrepiso y cortante basal	84
5.6	Modelos de edificios acoplados con tres dispositivos de control	87
5.6.1	Fuerzas de control efectivas (3 actuadores)	91
5.6.2	Disipación de energía y comando de fuerza	94
5.6.3	Distorsiones de entrepiso y cortante basal	97

CAPÍTULO 6. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Análisis del estudio y resultados	100
6.1.1	Evaluación de la investigación	100
6.1.2	Análisis de resultados	101
6.2	Conclusiones y estudios futuros	102

REFERENCIAS	104
--------------------------	-----

ANEXO 1	107
----------------------	-----

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profunda gratitud a las siguientes personas e instituciones, que de alguna manera han contribuido en la conclusión del presente trabajo.

Al Dr. Manuel E. Ruiz-Sandoval Hernández, que como director de este trabajo, ha transmitido de manera desinteresada todos sus conocimientos. Agradecerle también, no sólo por ser un excelente profesor que se interesa en el desarrollo personal y profesional de sus estudiantes, sino también por ser un amigo que estará presente por el resto de nuestras vidas.

Al Dr. Bill F. Spencer, quién fue participe de este trabajo y un ejemplo a seguir en el campo de la investigación.

A los profesores del posgrado de la UAM, que contribuyen en la formación de profesionales.

A México que me abrió las puertas del conocimiento, gracias a su prestigiosa institución como es la Universidad Autónoma Metropolitana, y CONACyT que es la entidad que promueve el desarrollo científico y estudiantil.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

A través de los años la construcción de estructuras civiles, como edificios, cubiertas, puentes, presas y otros, ha cobrado vital importancia dentro de la sociedad moderna. Los ingenieros, inicialmente en el diseño de estas estructuras, daban prioridad para resistir cargas estáticas (Fig. 1.1). Sin embargo, con el paso del tiempo se ha visto que muchas de estas estructuras estaban sujetas a solicitaciones dinámicas importantes como viento, sismo o tráfico entre otras, que producen vibraciones importantes sobre la estructura.

Se ha podido evidenciar que estas vibraciones producen daños importantes, no sólo a la edificación como tal, sino también a los componentes interiores de la estructura, y hasta pueden atentar contra la vida de sus ocupantes (Fig. 1.2).

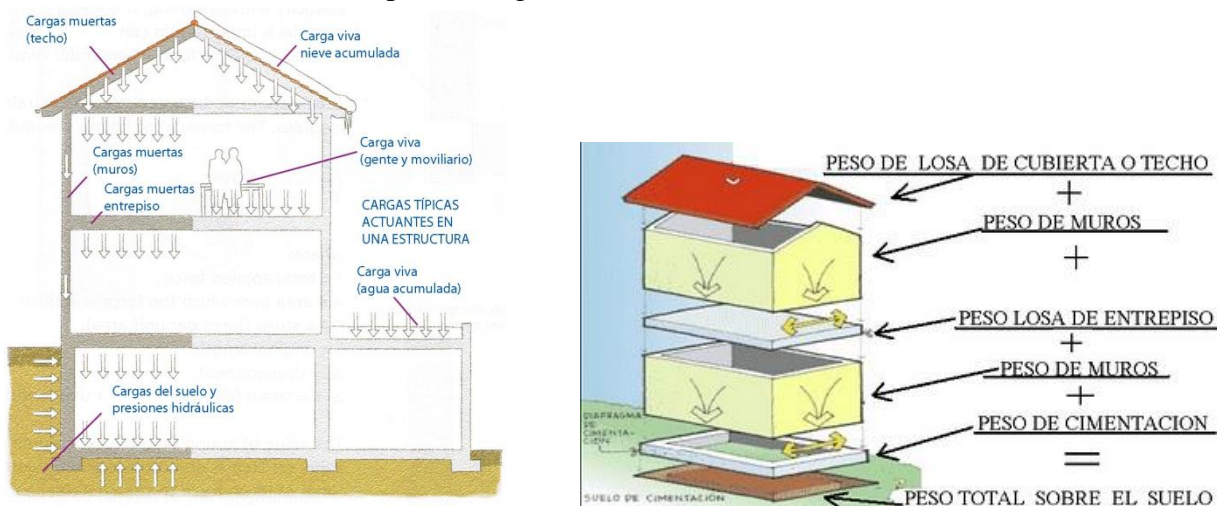


Fig. 1.1 – Cargas estáticas sobre las estructuras (<http://ingenieria-civil31.blogspot.com/>)

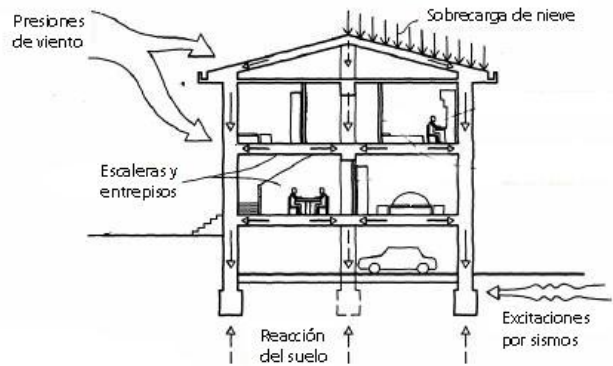


Fig. 1.2 – Cargas dinámicas sobre las estructuras (http://medlibrary.org/medwiki/Building_science)

Uno de los ejemplos más representativos del daño que pueden producir las cargas dinámicas es el ocurrido al Puente Tacoma (1940), que debido a la carga de viento, se produjo una vibración por galopeo que derivó en el colapso de la estructura (Fig. 1.3). También, se puede mencionar los diferentes sismos que en las últimas décadas han afectado las zonas urbanas en todo mundo (Fig. 1.4), cobrando la vida de miles de personas y millones de dólares en pérdidas materiales (Tabla 1.1)

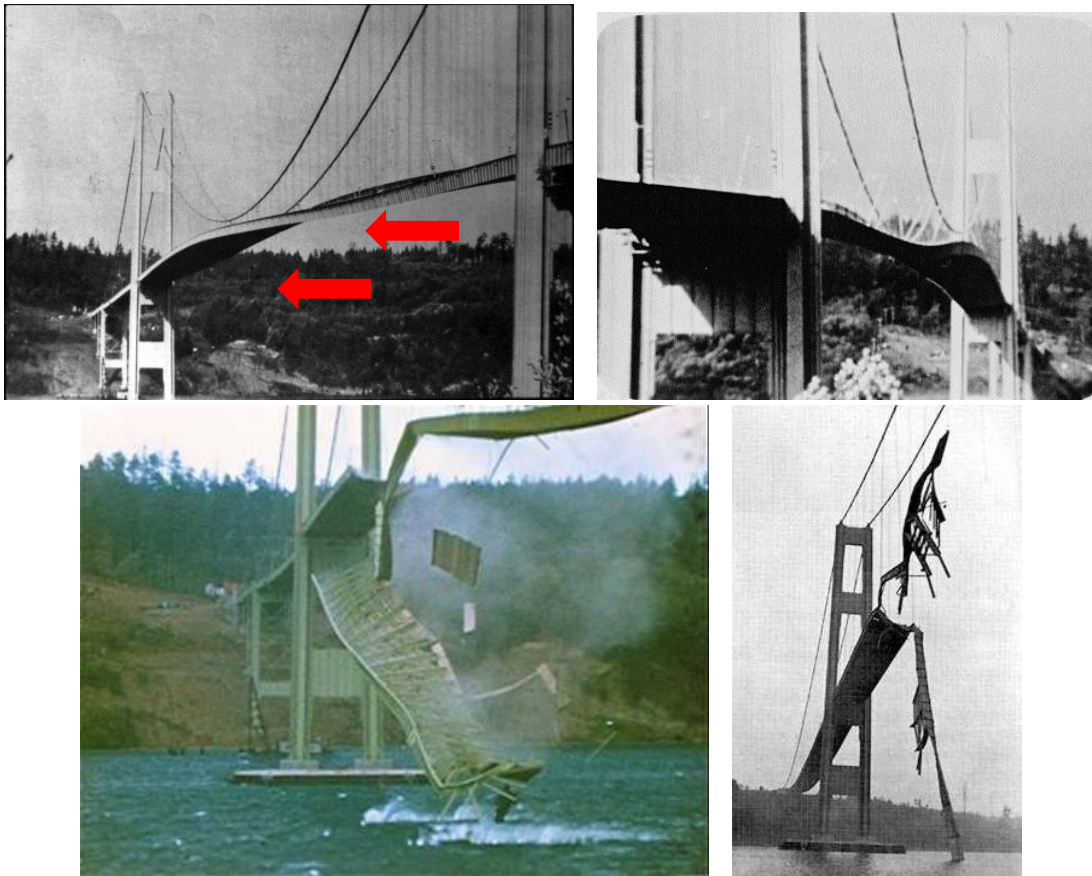


Fig. 1.3 – Colapso del puente Tacoma debido a cargas de viento (Noviembre 1940) (www.thefullwiki.org/Tacoma_Narrows_Bridge_Collapse)



Loma Prieta -1989 (www.usgs.gov)



Northridge, Ene. -1994 (www.usgs.gov)



Kobe, Ene. – 1995
(www.superstock.com/stock-photos-images/1783-16334)



Chile (Feb.-2010)
(www.smashingzine.com/2010_04_01_archive.html)



México (Sep.-1985)

(www.nuestra-gente.com/ShowForum.aspx?id=2&to=100917009)



México (Sep.-1985)

Fig. 1.4 – Daños causados por los diferentes sismos en las estructuras

TABLA 1.1: PRINCIPALES SISMOS PRODUCIDOS EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS

FECHA	NOMBRE Y UBICACIÓN DEL SISMO	PARÁMETROS DEL SISMO		EFECTOS DEL SISMO		
		Magnitud	Intensidad	Muertos	Heridos	Pérdidas económicas (Mill. \$us)
16/7/1990	PHILIPPINES: BAGUIO, CABANATUAN, DAGUPAN	7.8	9	2412		369.6
22/4/1991	COSTA RICA: LIMON, PANDORA	7.6	10	87		510
17/1/1994	CALIFORNIA: NORTHRIDGE	6.7	9	60	7000	40000
16/1/1995	JAPAN: SW HONSHU: KOBE, AWAJI-SHIMA, NISHINOMIYA	6.9	11	5502	36896	131500
26/9/1997	ITALY: CENTRAL: MARCHE, UMBRIA	6	10	14	100	4524.9
17/8/1999	TURKEY: ISTANBUL, KOCAELI, SAKARYA	7.6	10	17118	50000	20000
20/9/1999	TAIWAN: NANTOU, TAICHUNG, TAIZHONG	7.7	10	2297	8700	14000
26/1/2001	INDIA: GUJARAT: BHUJ, AHMADABAD, RAJOKOT; PAKISTAN	7.7	10	20005	166836	2623
21/5/2003	ALGERIA: ALGIERS, BOUMERDES, REGHIA, THENIA	6.8	10	2266	10261	5000
22/9/2003	DOMINICAN REPUBLIC: PUERTO PLATA, SANTIAGO	6.4	10	3	15	
27/9/2003	RUSSIA: KOSH-AGACH, UST'-ULAGAN, ONGUDAI, SHEBALINO	7.3	10	3	5	10.6
12/1/2010	HAITI: PORT-AU-PRINCE	7		222570	30000	8000
27/2/2010	CHILE: MAULE, CONCEPCION, TALCAHUANO	8.8	9	297	12000	30000
3/9/2010	NEW ZEALAND: CHRISTCHURCH	7	9			

***Datos obtenidos de: NESDIS National Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml>)**

Todos estos eventos extraordinarios nos muestran la vulnerabilidad de nuestra sociedad ante los desastres naturales, por ende la prioridad de los ingenieros es la protección de las estructuras civiles, su contenido y por supuesto la vida de sus ocupantes.

Los retos que afrontan los ingenieros, son encontrar nuevas y mejores maneras de diseñar estructuras que sean más resistentes a los efectos dañinos de las fuerzas dinámicas (sismo y viento). En la Fig. 1.5 se pueden ver algunas técnicas empleadas, ya sea para reducir las demandas dinámicas sobre la estructura, o absorber parte de la energía producida por dichas solicitaciones.

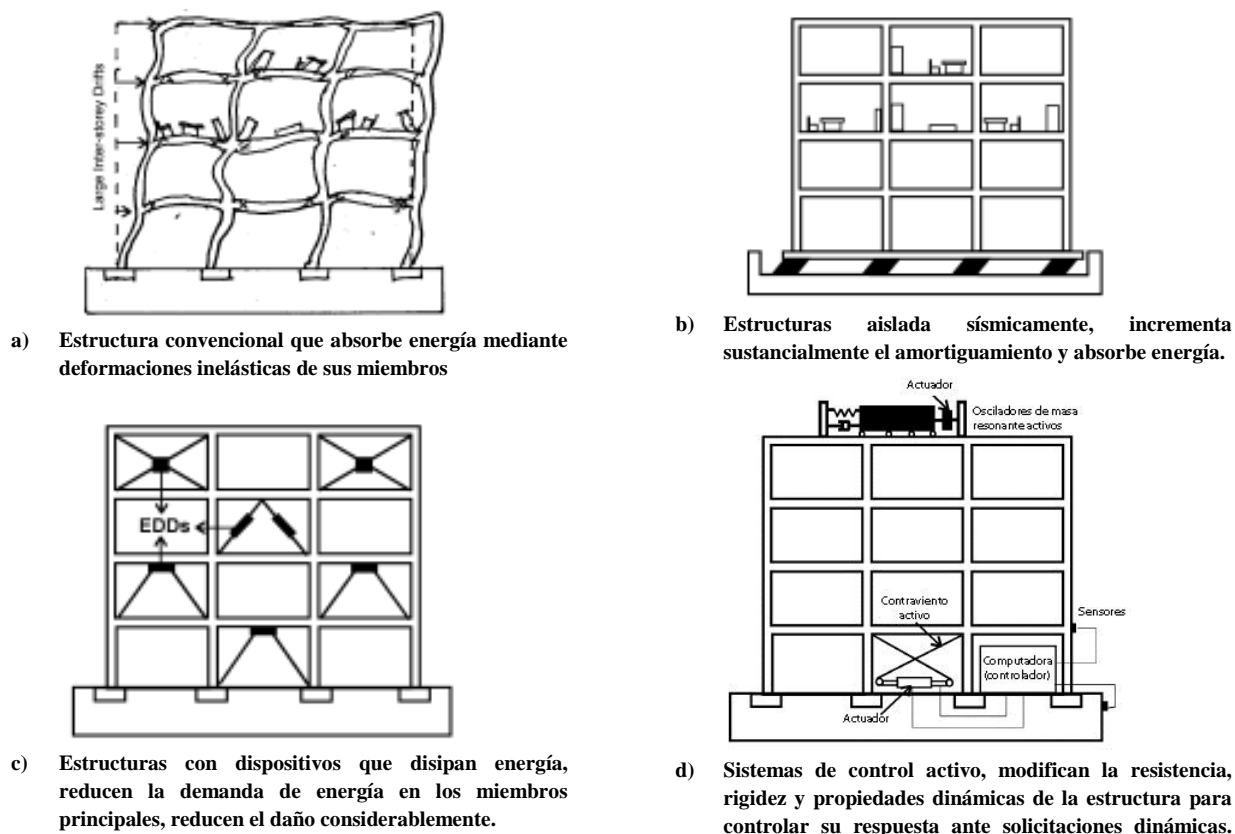


Fig. 1.5 – Métodos para reducir la respuesta de las estructuras ante solicitaciones dinámicas (Rai 2000)

Dentro de las técnicas más innovadoras (Fig. 1.5c, 1.5d), el control estructural de las obras civiles ha cobrado gran importancia en los últimos años, llegando a la etapa que muchos de estos sistemas ya han sido instalados en estructuras a escala real. Este concepto se sustenta en modificar la respuesta sísmica de las estructuras, incrementando artificialmente la disipación de energía, y de esa manera reducir su respuesta bajo excitaciones sísmicas.

A medida que los sistemas de control estructural han ido incrementando su popularidad en aplicaciones de ingeniería civil, numerosas técnicas y métodos han sido estudiados y propuestos para su utilización. Así mismo, con la ayuda de la tecnología y las computadoras que han cobrado gran importancia en estos días, las técnicas han ido evolucionando y los métodos mejorando paulatinamente.

Como una alternativa interesante de control estructural, surge la idea de acoplar edificios; cuyo concepto principal es conectar dos estructuras (en principio desiguales), de manera que bajo cargas sísmicas tengan un comportamiento en conjunto y ayuden a mitigar la respuesta ante dichas solicitaciones.

1.2 REVISIÓN DE LA LITERATURA Y TRABAJOS PREVIOS

En ingeniería estructural, el concepto de control fue desarrollado hace aproximadamente 50 años, y desde la fecha se han venido realizando pruebas en laboratorios sobre elementos estructurales a escala y estudios analíticos (Fig. 1.6). En la actualidad, esta técnica ha cobrado mucha importancia, y en muchas estructuras como edificios y puentes ya se han utilizado mecanismos de control en sus elementos (Christenson 2001).

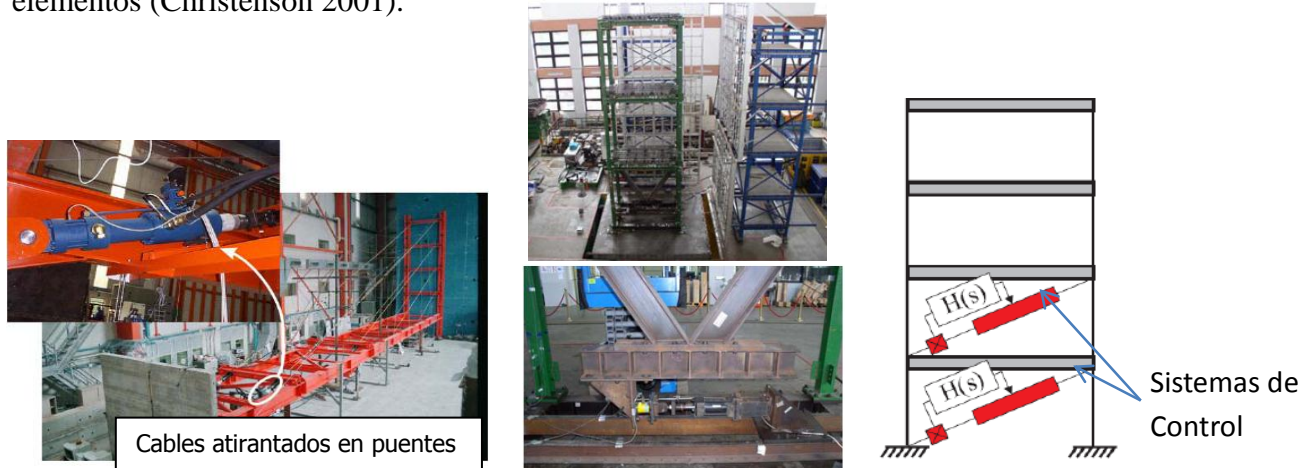


Fig. 1.6 – Ensayos a escala y estudios analíticos de sistemas de control estructural (Lynch 2005)

De acuerdo a la bibliografía revisada (Christenson 2001); el control estructural de edificios acoplados fue introducido en Estados Unidos hace más de 35 años por Klein et al. (1972) y pocos años después en Japón por Kuneida en 1974. A mediados de los años 80, Klein y Healy plantearon un sistema rudimentario de control semiactivo de edificios acoplados. El modelo consistía en unir los edificios con cables, que al ponerlos sueltos o tesarlos generaban cierto control de disipación.

En 1994 Gurley et al. estudiaron los efectos de control pasivo para edificios altos y bajos acoplados. Kamagata et al. en 1996, Fukuda et al. en 1996 y Sakai et al. en 1999 estudiaron el efecto de estructuras acopladas flexibles de altura considerable, con sistemas de control pasivo. Mientras que Luco et al. en 1994 y 1998 (Fig. 1.7), Xu et al. en 1999 y Ko et al. en 1999 estudiaron las conexiones bajas, medias y altas en edificios acoplados con mecanismos pasivos (fuente: Christenson 2001).

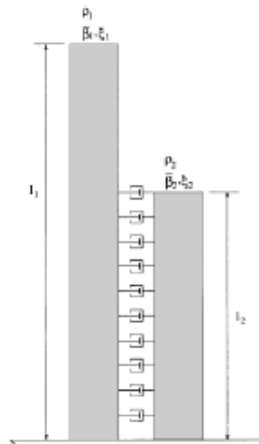


Fig. 1.7 – Modelos estudiados por Luco y De Barros (1998)

Según Christenson (2001), sistemas de control activo para estructuras flexibles han sido estudiadas por Seto et al. en 1994 - 1996, Luco y De Barros en 1998 y Xu et al. en 1999; obteniendo importantes resultados de simulaciones experimentales en modelos de edificios flexibles.

Sistemas de control semiactivo fueron propuestos por Christenson et al. (2001), quien estudió varias configuraciones de edificios acoplados (Fig. 1.8) y propuso varias líneas base de diseño. Christenson también realizó pruebas experimentales en edificios acoplados empleando respuestas de aceleración en 2003, y en 2007 plantea alternativas de control para estructuras similares.

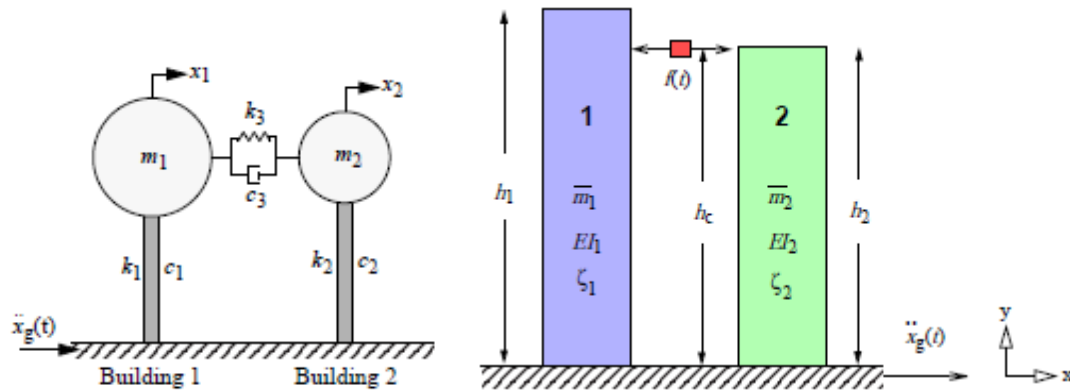


Fig. 1.8 – Modelos estudiados por Christenson et al. (2001)

En años recientes Zhu et al. (2001) propusieron sistemas control semiactivo en edificios acoplados, considerando dos masas de un grado de libertad conectados por dispositivos semiactivos; ensayos de los cuales se obtuvieron resultados favorables. En 2003, Cimellaro realiza modelos experimentales a escala de estructuras estándar en Italia (Fig. 1.9a). Cundumi en 2005, plantea un arreglo de dispositivos de control semiactivo en edificios acoplados (Fig. 1.9b)

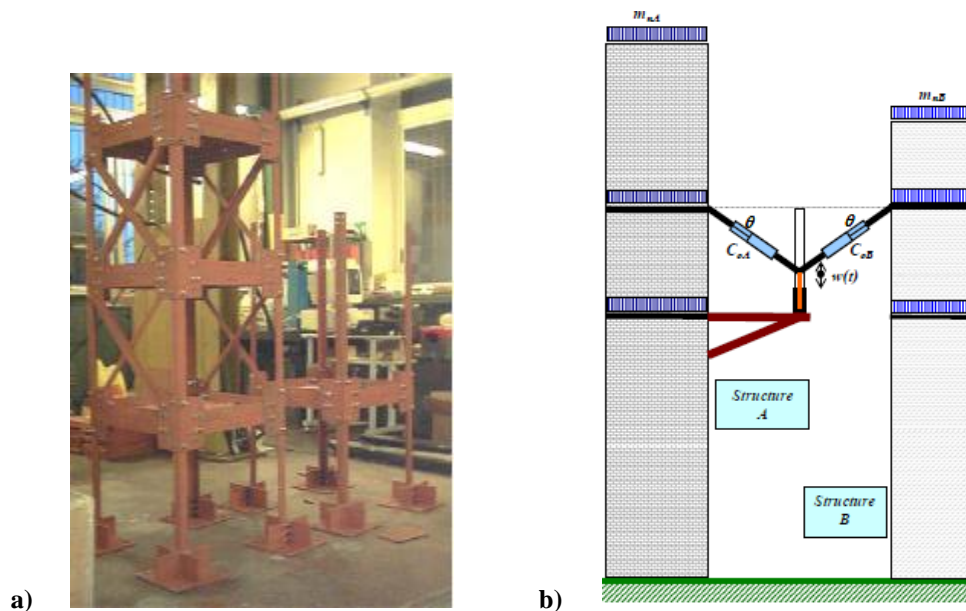


Fig. 1.9 – Modelos estudiados por: a) Cimellaro (2003) y b) Cundumi (2005)

Se han investigado algunas variantes de acoplamiento, entre las más importantes; Fujimura et al. (2004) estudiaron y realizaron modelos experimentales sobre vibraciones de edificios dispuestos en paralelo (Fig. 1.10a) y Watanabe et al. (2010) analizó alternativas de control para acoplar estructuras con base simplemente aislada (Fig. 1.10b).

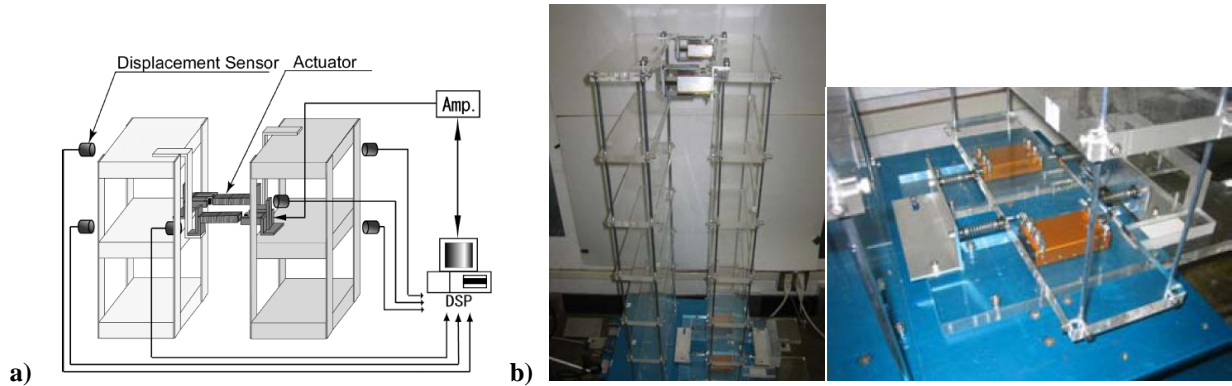


Fig. 1.10 – Modelos estudiados por a) Fujimura et al. (2004) y b) Watanabe et al. (2010)

Además de los estudios académicos realizados en los últimos años, es necesario mencionar las aplicaciones prácticas de estos sistemas de control en estructuras de tamaño real. En 1989 se usaron mecanismos de control en el edificio Inteligente Kajima (Tokio). Otros ejemplos de edificios acoplados como el Saint Luke's Tower (Fig. 1.11) y la Plaza Tritón en Tokio (Fig. 1.12), muestran el interés que han cobrado los sistemas de control activo, pasivo y semiactivo para la reducción de la respuesta sísmica. Su uso actual da una pauta de que en un futuro no muy lejano, este tipo de dispositivos serán muy populares.



(Christenson - 2001)



(<http://muza-chan.net/japan/index.php/>)

Fig. 1.11 – Edificio inteligente Kajima (Tokio – 1989) - Saint Luke's Tower (Tokio)

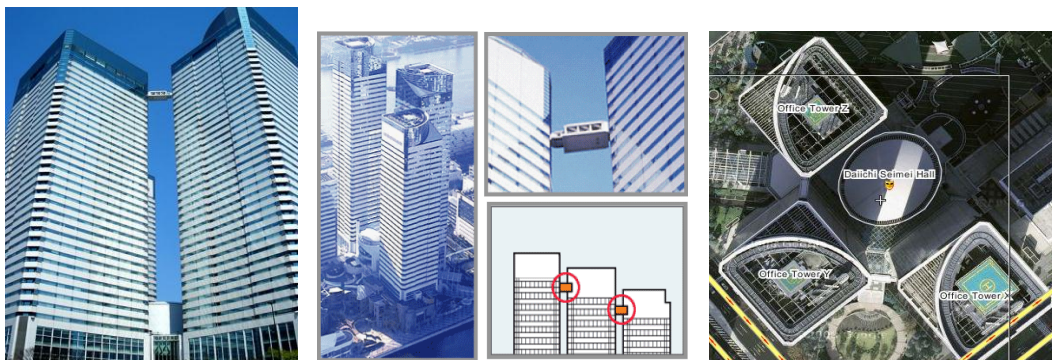


Fig. 1.12 – Plaza Tritón (Tokio – Marzo 2001) – fuente: <http://en.domotica.net/>, <http://maps.google.com>

1.3 PROBLEMÁTICA

En la actualidad, debido a las limitaciones de terreno en las ciudades modernas (alta densidad de población), los edificios son construidos más cercanos el uno al otro, es decir las edificaciones se encuentran de alguna manera lado a lado (Fig. 1.13). Estos edificios separados por cortas distancias están libres de cualquier conexión estructural entre sí, y sólo se encuentran conectados a nivel del terreno; por tanto la resistencia ante solicitaciones sísmicas de cada estructura dependerá de si misma.

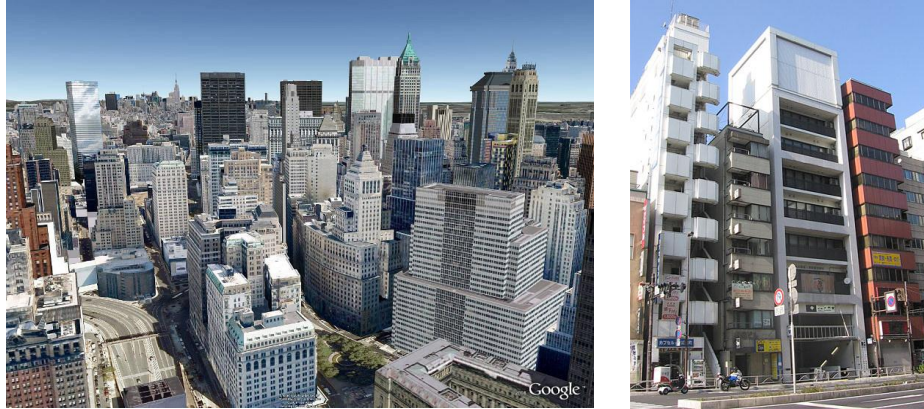


Fig. 1.13 – Ciudades modernas y limitaciones de terreno (New York City y Tokio)

En años recientes el concepto de control estructural ha sido usado para mejorar la resistencia de las edificaciones ante solicitaciones sísmicas. Con ello el método de control de edificios acoplados ha resultado ser un método viable para la protección de las estructuras contra los desastres naturales, bajo la premisa de permitir a cada una de las estructuras vibrar a diferentes frecuencias y así ejercer fuerzas de control una sobre la otra.

Por otro lado, en varios reportes y documentales sobre los daños producidos por el terremoto de 1985 en la ciudad de México, se menciona que la excitación originada por las ondas sísmicas derivó en el fenómeno de “golpeteo” (Fig. 1.14).



Fig. 1.14 – Fenómeno de golpeteo producido por excitaciones sísmicas (México – 1985)

(<http://www.nuestramirada.org/photo/terremoto-mexico-1985-1>)

Este fenómeno se refiere al choque de las estructuras entre sí, provocando daños considerables y hasta el colapso de algunas; por lo que se podría considerar como una alternativa, acoplar las estructuras mediante dispositivos de control para evitar dicho efecto.

Por otro lado, la idea de acoplar estructuras no sólo parte desde la concepción inicial de los proyectos (Fig. 1.15a), sino que se ha visto como alternativa de solución estructural para reforzar edificaciones con problemas de capacidad de carga, es decir, la construcción de otra estructura similar que sirva de apoyo y/o refuerzo para la inicialmente construida. Uno de éstos ejemplos es el conjunto de edificios “h” de la Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco (Fig. 1.15b).



a) **Acoplar estructuras como concepción inicial del proyecto** (<http://muza-chan.net/japan/index.php/>)



b) **Solución para reforzar estructuras ya construidas**

Fig. 1.15 – Acoplar estructuras desde el punto de vista de concepción del proyecto

En la presente investigación se pretende estudiar las ventajas que presenta un sistema de edificios acoplados, respecto a un sistema no acoplado, sus características, el ahorro económico que implicaría construir dos estructuras acopladas y los beneficios que representa esta alternativa para mitigar las respuestas en aceleraciones, velocidades y desplazamientos durante un evento sísmico considerable.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Estudiar los sistemas de control semiactivo implantados a modelos de edificios acoplados, comparar las diferentes estrategias de control y analizar el comportamiento dinámico de los modelos, para mejorar su respuesta ante sollicitaciones sísmicas.

1.4.1 Objetivos específicos

- Estudiar las diferentes alternativas de control estructural (activo, pasivo, semiactivo e híbrido).
- Analizar el comportamiento y características dinámicas de los modelos acoplados y no acoplados
- Acoplar las estructuras mediante dispositivos de control y determinar sus particularidades.
- Utilizar dispositivos de control activo, pasivo y semiactivo, y realizar una comparación de los sistemas en edificios acoplados.
- Analizar las características de los sistemas de control semiactivo (coeficiente de amortiguamiento, posición y cantidad) y sus incidencias en edificios acoplados.

1.5 RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se basa en sistemas de control semiactivo utilizados en edificios acoplados y está organizada de la siguiente manera:

Capítulo 2. - En la literatura revisada, se mencionan cuatro tipos de sistemas de control estructural, activo, pasivo, semiactivo e híbrido. En este capítulo, se realiza una revisión sobre los diferentes tipos de control, se mencionaran sus ventajas, desventajas y tipos de dispositivos utilizados en la actualidad (Fig. 1.16).

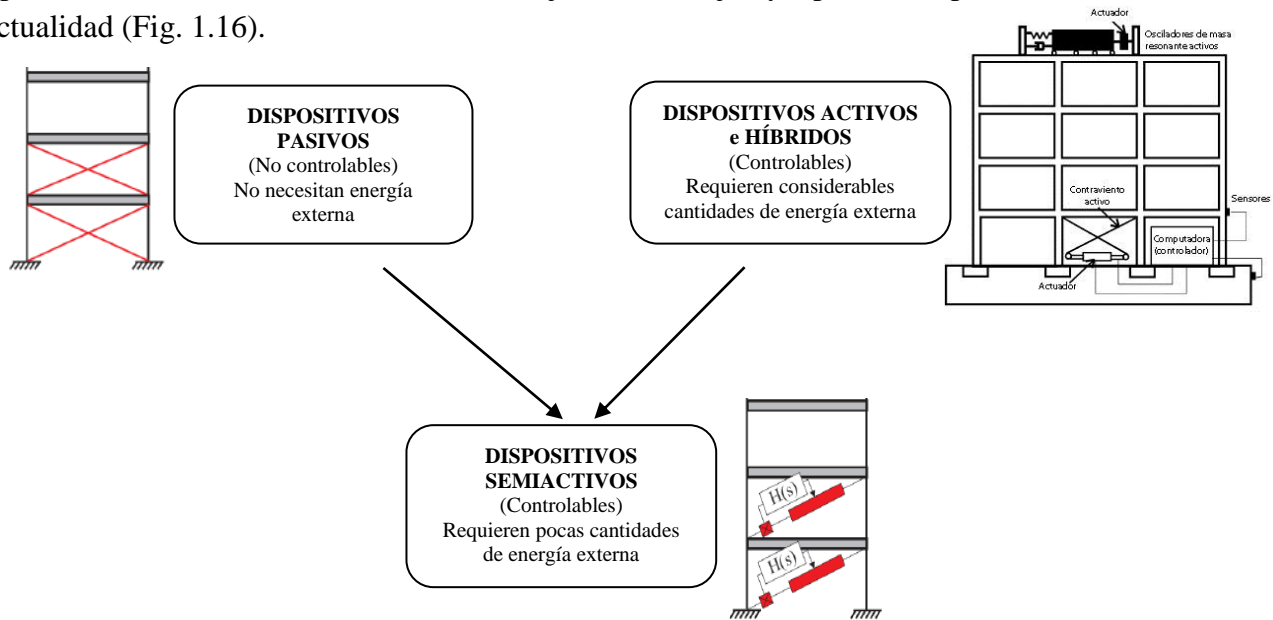


Fig. 1.16 – Sistemas de control estructural utilizados en ingeniería civil actualmente

En este capítulo se realiza una breve comparación de los dispositivos de control, y de acuerdo a las limitaciones económicas y tecnológicas que se cuenta, se plantea un sistema tentativo para su aplicación en edificios acoplados.

Capítulo 3. – En este capítulo se realiza una presentación sobre edificios acoplados y sus principales características, considerando modelos simples de 2GDL.

También se describen las estructuras S.A.C.¹ que se utilizarán en este trabajo (edificios de tres y nueve niveles) y que han sido utilizados como referencia en otros estudios

Se presenta un estudio de cada estructura por separado, y se determinan sus propiedades dinámicas a través de la representación en el espacio de estados. Se incorpora un amortiguador empotrado fijo en el último nivel de cada modelo, y se analizan los cambios que produce este dispositivo sobre cada edificio.

¹ S.A.C. The Structural Engineers Association of California (SEAOC), the Applied Technology Council (ATC) and California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE).

Capítulo 4. – En este capítulo se acoplan los edificios mediante un amortiguador. Se analiza el sistema en conjunto, que ahora es uno solo (Fig. 1.17).

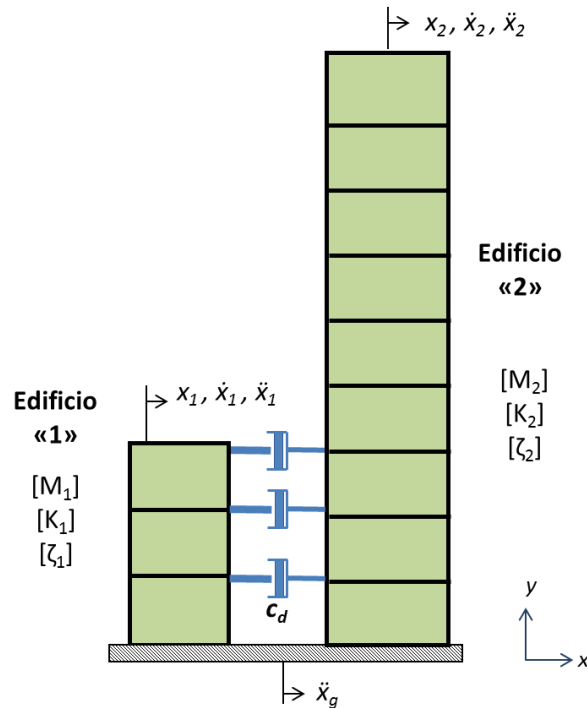


Fig. 1.17 – Modelos de edificios acoplados estudiados

Se estudian varias opciones de ubicación (nivel en que se encuentren) y cantidad de los dispositivos de acoplamiento. De acuerdo a ello se recomiendan las mejores alternativas.

Capítulo 5. – En este capítulo se analizan las alternativas de control que se utilizarán como dispositivo de acoplamiento entre edificios. Se estudian y utilizan algoritmos de control para dispositivos activos y semiactivos.

Se realiza una comparación entre los diferentes dispositivos de control utilizados y se comentan los resultados.

Capítulo 6. – En este capítulo se analizan los resultados. Se realizarán conclusiones y se proponen varias alternativas para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL

2.1 GENERALIDADES

Históricamente, los desastres naturales como huracanes, terremotos, tsunamis y otros han afectado a la humanidad. Estos efectos no sólo han producido incalculables pérdidas económicas, sino también han cobrado la vida de millones de personas. En los últimos 20 años, el número de víctimas debido a eventos extraordinarios como terremotos, tsunamis y otros fue aproximadamente de 744,321, que resulta en un promedio de 37,216 muertes por año (USGS - Earthquake Hazards Program).

En las últimas décadas, el control estructural ha cobrado gran importancia como alternativa eficaz para mitigar los efectos dañinos de los desastres naturales (sismo y viento). Debido a esto, los investigadores han volcado la mirada sobre esta metodología y empezado a trabajar para hacer de ella una tecnología factible para su aplicación.

La noción de control estructural se remonta 110 años atrás, cuando John Milne (Profesor de ingeniería en Japón) construye una pequeña casa de madera sobre esferas, para demostrar que la estructura puede estar aislada de los movimientos del terreno. Por otro lado, a principios del siglo XX, se vio que los motores de los automóviles y aviones producían importantes vibraciones sobre los puntos de conexión, por ello se vio la necesidad de aislar, absorber o incrementar el amortiguamiento de dichas vibraciones (Housner et al. 1997).

2.1.1 Concepto de control estructural

Se puede definir como: *“Aquellos sistemas de control que tienen la finalidad de proporcionar a las estructuras que los poseen, un desempeño sísmico superior basados en el conocimiento del peligro sísmico de una región, efectos de sitio; dinámica estructural y ubicación óptima e inteligente de dichos dispositivos, para absorber o disipar la energía demandada por efectos dinámicos (sismos o viento)”* (Tena 2011).

Dentro de la concepción de diseño tradicional de estructuras, comúnmente los elementos se diseñan de tal manera que absorban la energía producida por las vibraciones externas (mediante deformación inelástica), con ello se acepta que los dichos elementos toleren cierto daño. Sin embargo, con la idea de control estructural se quiere eliminar o minimizar el daño en los elementos principales, y que los dispositivos de control hagan el trabajo de disipación, o en su caso, absorción de la energía bajo acciones dinámicas accidentales (sismo o viento).

Entonces, el propósito principal de los sistemas de control es absorber la energía introducida por las cargas dinámicas, dicha energía podría ser denotada de la siguiente manera (Uang y Bertero 1988):

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (2.1)$$

dónde:

E = Energía total producida por el sismo (ley de conservación de energía).

E_k = Energía cinética de la estructura.

E_s = Energía por deformación elástica de la estructura (recuperable)

E_h = Energía disipada por la estructura debida a deformación inelástica.

E_d = Energía disipada por amortiguamiento adicional.

Para una estructura convencional, la ecuación (2.1) sólo estaría compuesta por E_k , E_s y E_h . Cuando se agrega al sistema un dispositivo de control, el término E_d es introducido. Este ayuda a reducir los valores de E_k , E_s y E_h (más importante).

2.2 TIPOS DE CONTROL ESTRUCTURAL

Existen tres principales clases de dispositivos que agregan amortiguamiento suplementario al sistema, los cuales pueden ser categorizados como estrategias de control. El primer tipo se denomina pasivo, y su característica principal es que no es controlable y no requiere ningún tipo de energía externa. El segundo tipo se llama activo, y su particularidad es que puede ser controlado; sin embargo requiere grandes cantidades de energía externa para operar. El tercer tipo se denomina semiactivo y combina los aspectos positivos de los sistemas de pasivos y activos. Son sistemas que pueden ser controlados hasta cierto punto y requieren pocas cantidades de energía externa.

Es necesario mencionar que los sistemas de control híbrido (utilizados en la actualidad), son sistemas que pueden utilizar dos o más de las tres principales estrategias de control, ya sea pasivo-activo o pasivo-semiactivo. Más adelante se detallan cada uno de los sistemas de control.

En la actualidad, los dispositivos de control pasivos, activos, semiactivos e híbridos son una alternativa atractiva para proteger las estructuras ante los desastres naturales. Los dispositivos pasivos como aisladores de base, amortiguadores viscoelásticos y osciladores de masa resonante, han sido bien estudiados y han llegado a ser aceptados por la comunidad ingenieril, como un método de mitigación ante cargas dinámicas. Sin embargo, estos dispositivos no son capaces de adaptarse y variar de acuerdo a los cambios estructurales y condiciones de carga (Spencer y Nagarajaiah 2003).

Por otro lado, sistemas de control activo han sido utilizados en estructuras de tamaño real (principalmente en Japón); pero los costos elevados y las condiciones de confiabilidad han limitado su aceptación. Debido a su simplicidad mecánica, bajas cantidades de energía requerida y grandes capacidades de fuerza controlada, los dispositivos semiactivos han cobrado gran importancia como un método de reducción de la respuesta sísmica (Spencer y Nagarajaiah 2003).

2.2.1 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO

Son aquellos sistemas de control que no requieren una fuente externa de energía. Las fuerzas de control que imparten estos sistemas son desarrolladas en respuesta al movimiento de la estructura. La energía en un sistema estructural pasivamente controlado, no puede ser incrementada por los dispositivos de control pasivos (Housner et al. 1997).

Esta alternativa de control se la puede denominar como una de las estrategias más sencillas de implantar, y debido a ello, los costos iniciales son más bajos en comparación con los sistemas de control activo, semiactivo e híbrido. En la actualidad, se pueden dividir en tres tipos:

2.2.1.1 Osciladores de Masa Resonante (TMD por sus siglas en inglés)

El principio de los osciladores de masa resonante (TMD), tiene sus orígenes en ingeniería mecánica a principios del siglo XX, como dispositivo para reducir las vibraciones en las máquinas.

Su concepto consiste en agregar una masa relativamente pequeña (5%) al sistema, la cual está unida a la estructura mediante un resorte y elementos de amortiguamiento especiales, que hacen vibrar a esta masa adicional a una frecuencia muy cercana a la frecuencia de la estructura principal. De esta manera la masa adicional responderá a la resonancia y reducirá la respuesta del sistema principal (Fig. 2.1).

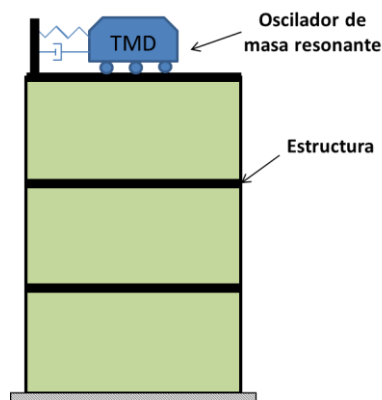


Fig. 2.1 – Control Pasivo – Osciladores de Masa Resonante (TMD)

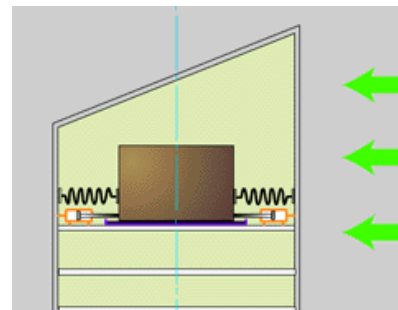
En las últimas décadas, numerosos estudios y pruebas de laboratorio han sido realizados acerca de estos dispositivos de control. Se puede decir que su comportamiento ante cargas dinámicas de viento ha sido bien estudiado, y su reducción de la respuesta ante dichas solicitaciones muy efectivo. Por ello su aplicación en estructuras de escala real se ha incrementado. Dentro de algunos ejemplos de aplicación se mencionan al John Hancock Tower (Boston-MA), el Citicorp Center office Building (Ciudad de New York) y la Torre de Taipéi en Taiwán (Fig. 2.2).



a) Torre de Taipéi – Taiwán (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Taipei_101_mass_damper_MichaD_4.jpg)



b) John Hancock Tower –Boston (http://graphics.boston.com/news/special/audio_slideshows/hancock/)



c) Citicorp Center office Building Nye York (www.salvadori.org/aoc/unit9.html)

Fig. 2.2 – Aplicaciones de TMD.

Otro tipo de sistema similar son los osciladores de líquido resonante (TLD por sus siglas en inglés). Su principio es el mismo que los TMD; la diferencia es que estos dispositivos de control contienen líquidos viscosos y de acuerdo al movimiento de dicho líquido se logra reducir la respuesta de la estructura principal. Una característica importante de estos sistemas es que no necesitan de un mecanismo de activación como los TMD.

2.2.1.2 Disipadores de energía

Este tipo de control pasivo consiste en colocar dispositivos especiales en lugares estratégicos de la estructura original, cuya función es disipar o absorber la energía producida por excitaciones dinámicas (sismo o viento); ya sea mediante deformación inelástica, fricción o amortiguamiento adicional (Fig. 2.3).

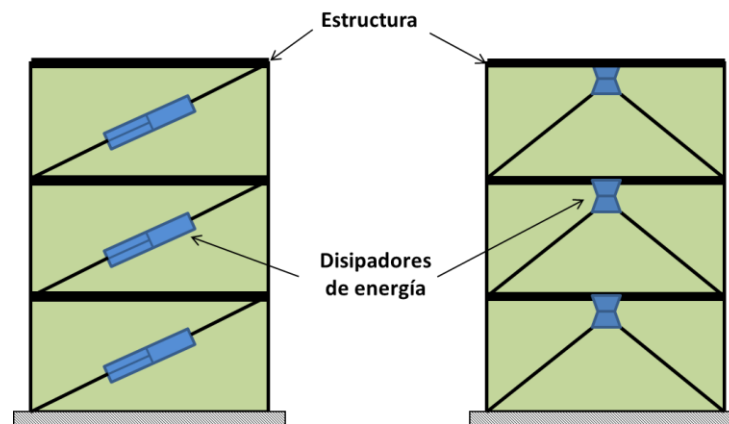


Fig. 2.3 – Control Pasivo – Disipadores de energía

Dentro de los principales disipadores de energía se indican los siguientes:

a) *Disipadores por deformación plástica del material (Histéresis).*- Uno de los mecanismos más eficientes para disipar energía producida por un sismo es a través de la deformación inelástica de los materiales. La idea es absorber una gran cantidad de energía sísmica mediante dispositivos de metálicos y fue inicialmente propuesta por Kelly y colaboradores en 1972 y Skinner y colaboradores en 1975 (Tena 2011).

Las características de estos dispositivos son: el comportamiento histerético estable con el que cuentan, no fallan por fatiga del material, su elevada confiabilidad y no son dependientes de las condiciones de temperatura.

Debido a sus ventajas y sus bajos costos con respecto a los demás sistemas de control, su uso en estructuras de escala real se ha incrementado rápidamente en las últimas décadas. Dentro de los más importantes se puede mencionar los ADAS (Added Damping and Stiffness), los TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness), los dispositivos Solera estudiadas por Aguirre, Sánchez y González Alcorta en 1989 y 1992; y los tipo panel de cortante, más conocidos como LYSSP (Low Yield Steel Shear Panel) entre otros (Fig. 2.4) (Tena-Colunga 2007).

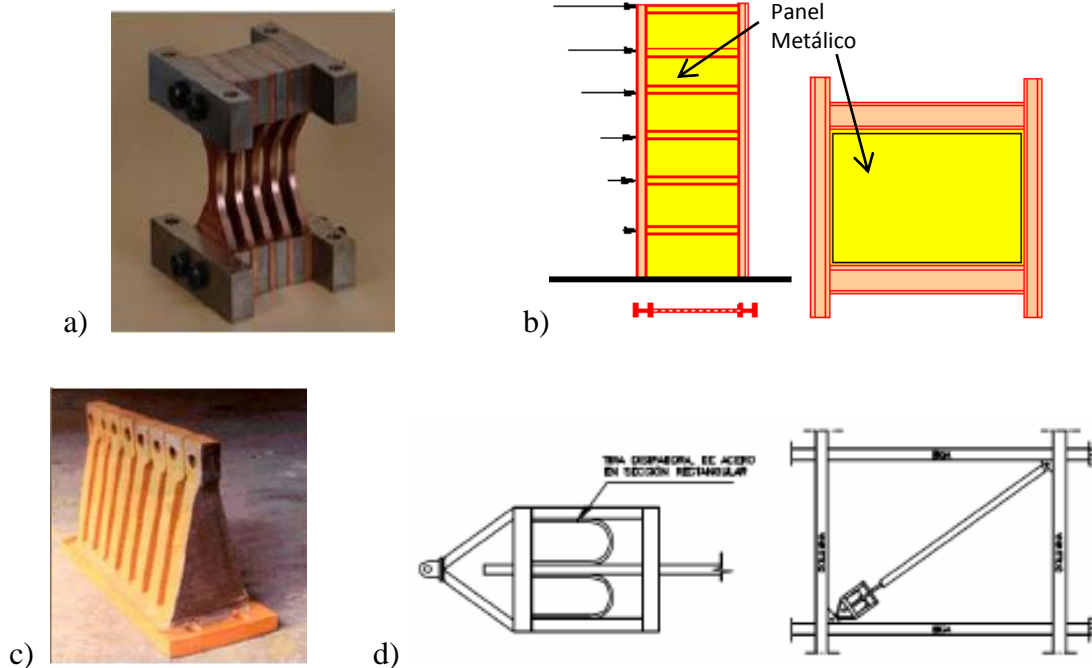


Fig. 2.4 –Disipadores de energía por histéresis a) ADAS, b) Shear panel c) TADAS y d) Solera
(a),(c),d) Morales 2007 y b) <http://hamidsoltani.com/seismic.php>)

La aplicación de estos dispositivos en modelos de escala real en todo el mundo ha sido ampliamente aceptada, por ello es difícil mencionar el número y detalle de sus aplicaciones. En México la empresa EMRSA, del ingeniero Martínez-Romero, ha utilizado dispositivos ADAS en varios edificios, y ha colaborado en la instalación de otro tipo de dispositivos pasivos (Tena 2011).

b) Disipadores de energía por fricción.- Es otra alternativa que ha sido utilizada por muchos años en los frenos de automóviles para disipar la energía cinética debida al movimiento. En ingeniería estructural una gran variedad de dispositivos han sido propuestos y desarrollados, dependiendo de su sistema mecánico y los materiales friccionantes.

Entre los más importantes se tiene: los dispositivos Pall, las conexiones atornilladas friccionantes (slotted-bolted connection), dispositivo friccionante Sumitomo, y las conexiones postensadas friccionantes (post-tensioned friction damper connections PFDC) entre otros (Tena 2011) (Fig. 2.5).



a) Disipadores de energía por fricción Pall (www.bcee.concordia.ca/index.php/Pall's_friction_dampers)

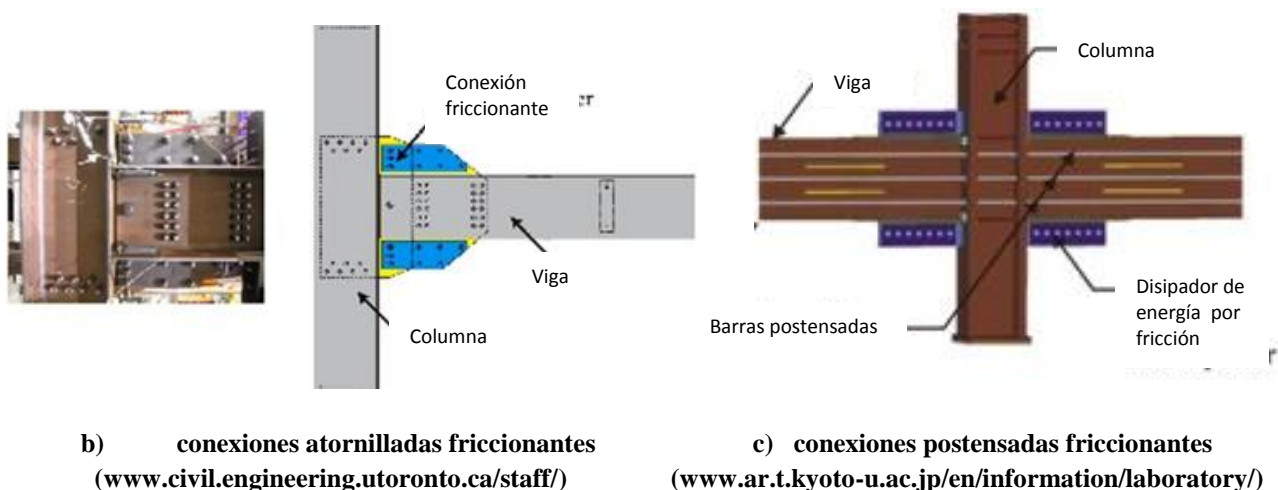
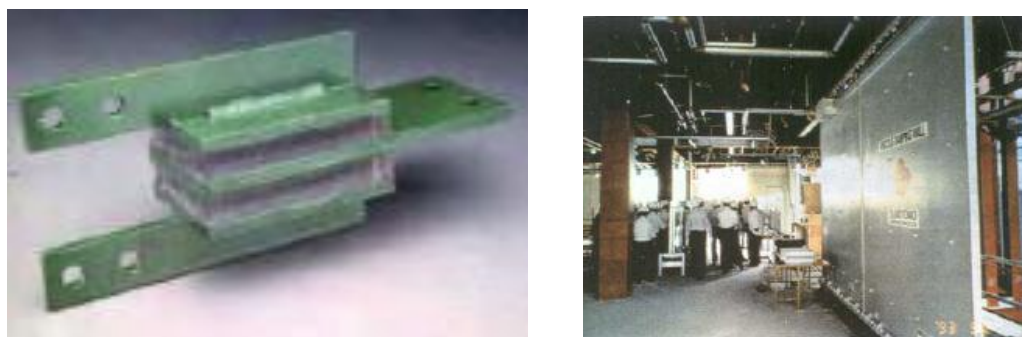


Fig. 2.5 –Disipadores de energía por fricción

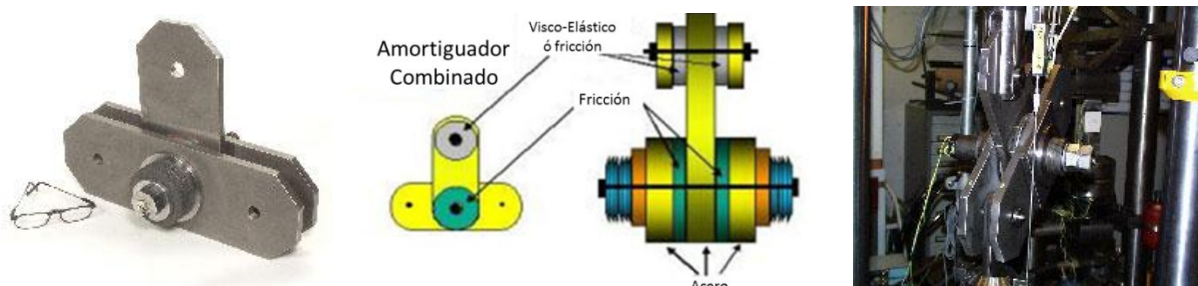
c) *Disipadores viscoelásticos.*- La reducción de vibraciones utilizando materiales viscoelásticos data de 1950 (en ingeniería espacial) y su principal característica es utilizar materiales sólidos viscoelásticos para conseguir disipar energía en todos los grados de deformación (Housner et al. 1997).

En ingeniería civil el estudio de estos dispositivos no empezó sino hasta los años 70's. Comúnmente estos dispositivos utilizan materiales como polímeros acrílicos o sustancias vítreas. Cabe mencionar, que el comportamiento viscoelástico bajo cargas dinámicas depende de la frecuencia de vibración, esfuerzos y temperaturas ambientales, por lo que resulta difícil el diseño y control de estos dispositivos.

Entre los más importantes se puede mencionar: los dispositivos viscoelásticos desarrollados por la empresa 3M y que fueron usados en las ahora extintas Torres Gemelas (WTC), muros viscoelásticos que utilizan fluidos viscosos (Sumitomo-Japón), y disipadores combinados denominados F-VEDD (Friction-Viscoelastic Damper Device) desarrollado por una empresa danesa entre otros (Tena 2011) (Fig. 2.6).



a) Disipadores de energía viscoelástico y muros viscoelásticos (Cundumi 2005)



b) Disipadores de energía combinados, F-VEDD (www.damptech.com/old/products/products.htm)

Fig. 2.6 – Control Pasivo – Disipadores de energía viscoelásticos

d) *Disipadores viscosos.* – Este tipo de dispositivos utilizan fluidos viscosos para disipar energía y existen varias configuraciones y materiales propuestos para este tipo de disipadores. La mayoría de estos sistemas son utilizados en la industria aeroespacial y en aplicaciones militares; sin embargo, su aplicación en ingeniería civil se ha incrementado desde principios de los 90's.

Normalmente estos disipadores están hechos de un tubo de acero inoxidable rellenos con un fluido de silicón, el cual es comprimido por un pistón de acero que tiene una placa de bronce con orificios. Las fuerzas generadas son proporcionales a la velocidad con que se mueve el pistón. (Tena 2011) (Fig. 2.7).

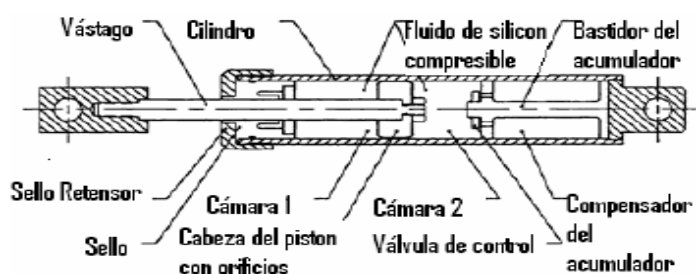


Fig. 2.7 – Control Pasivo – Disipadores de energía viscosos (Housner et al. 1997)

Debido a sus ventajas, este tipo de disipadores ha cobrado mucha popularidad en los últimos años y su aplicación en estructuras reales se ha incrementado gradualmente (Fig. 2.8).

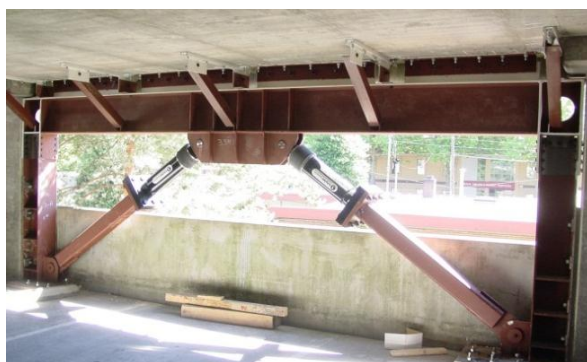


Fig. 2.8 –Disipadores viscosos (Edificio de estacionamiento, Kent/WA – Torre Mayor, México D.F.)

2.2.1.3 Aisladores de base

Este tipo de control consiste en introducir dispositivos especiales, ya sea entre la estructura y la cimentación (edificios), o entre las pilas y la superestructura (puentes). Su función principal es aislar la estructura principal de los movimientos del terreno (Fig. 2.9). En un caso de aislamiento perfecto, la estructura no debería experimentar movimiento relativo alguno (Tena 2011).

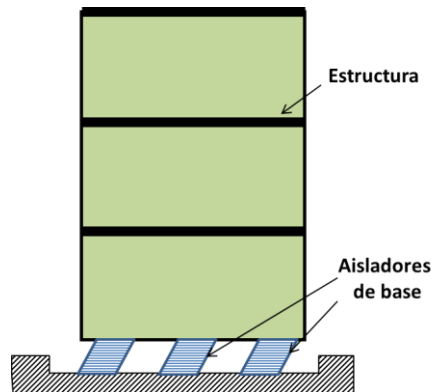
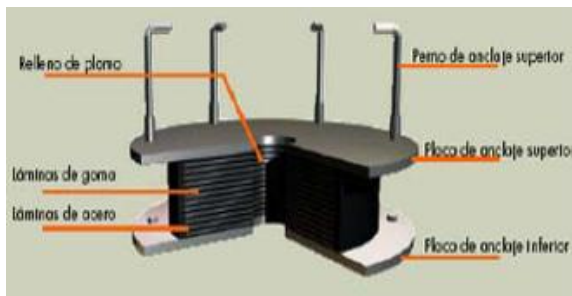
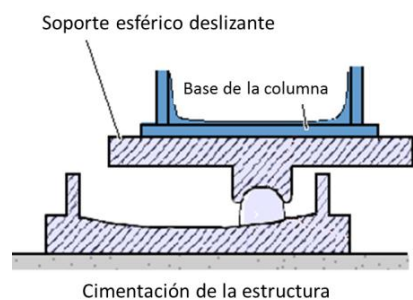


Fig. 2.9 – Control Pasivo – Aisladores de base

Entre los aisladores más comunes se tiene: elastómericos (laminados y laminados con corazón de plomo), amortiguadores histeréticos de acero (flexión o torsión), amortiguadores por extrusión de plomo, teflón, deslizantes, y de fricción entre otros (Fig. 2.10).



Aisladores elastómericos laminados (Morales 2007)



Amortiguadores histeréticos de acero y deslizantes (<http://earthsci.org/processes/geopro/seismic/seismic.html>)

Fig. 2.10 – Aisladores de base

2.2.2 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO

Son aquéllos que mediante una fuente externa de energía controlan actuadores que ejercen determinadas fuerzas sobre la estructura. Dichas fuerzas pueden incrementar o disipar energía sobre la estructura. Este tipo de control utiliza sistemas electromecánicos que son controlados por una computadora.

En este tipo de control, se ejercen fuerzas sobre la estructura para contrarrestar la energía producida por el sismo; además, se pueden controlar varios modos de vibración y adaptarse a diferentes condiciones de carga. Los sistemas de control activo proporcionan un desempeño superior sobre los sistemas de control pasivo, debido a que un dispositivo activo utiliza la respuesta global de la estructura para proporcionar las fuerzas de control adecuadas; por otro lado, un sistema pasivo limita su acción a respuestas locales. En resumen, se puede decir que el diseño de sistemas activos es más complejo, además de necesitar sensores y equipos de control apropiados (Christenson 2001).

Una de las preocupaciones de los sistemas de control activo es la cantidad de energía para producir las fuerzas de control, especialmente cuando se produce un efecto extraordinario como un sismo. Además, es necesario tomar en cuenta que cualquier error en las fuerzas generadas por el sistema de control podría desestabilizar el sistema.

Dentro de algunos ejemplos de control activo se indican los siguientes: contravientos, aisladores de base y osciladores de masa activos (Fig. 2.11).

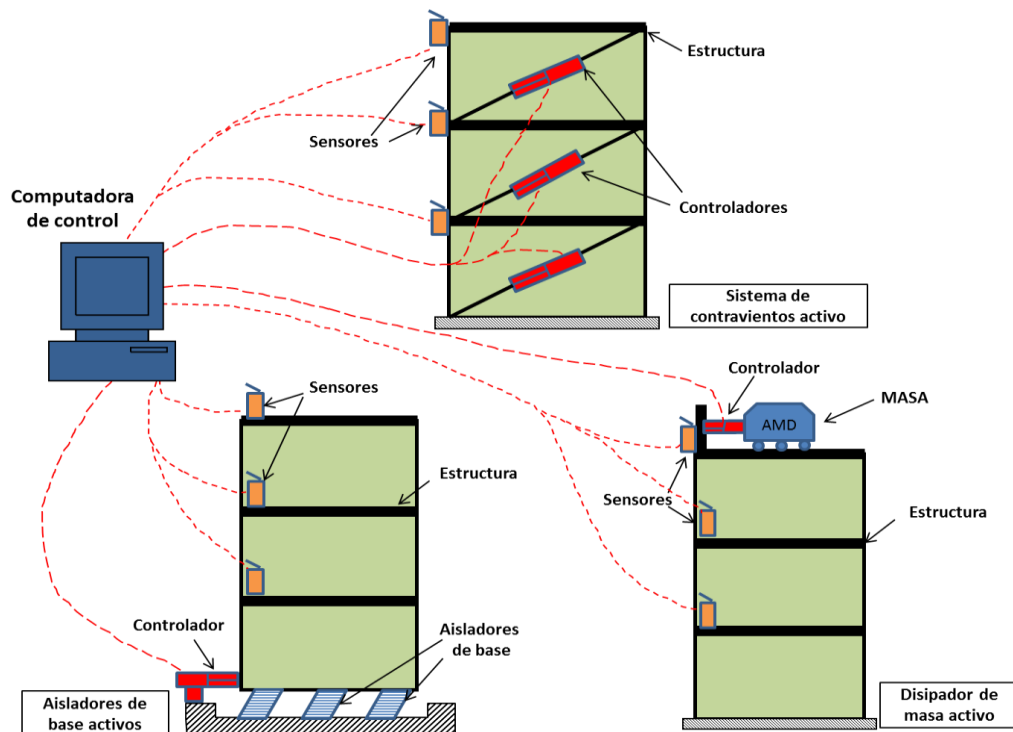


Fig. 2.11 – Dispositivos de control activo

Los objetivos de diseño de un sistema de control activo se puede definir como: *“Mantener los esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y aceleraciones, en determinados puntos de la estructura, por debajo de los límites especificados, bajo la presencia de acciones accidentales (viento o sismo)”* (Housner et al. 1997).

Existen dos maneras de cumplir estos objetivos: utilizando modelos matemáticos y sin modelos matemáticos; para ambos casos el diagrama de la figura 2.12 tiene que cumplirse.

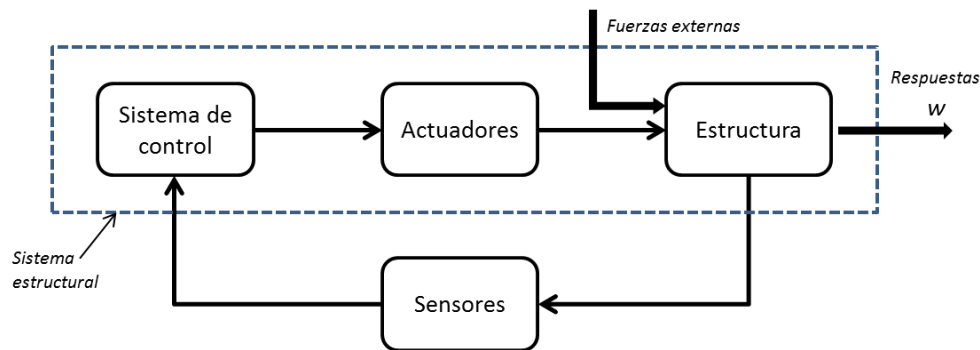


Fig. 2.12 – Estructura de funcionamiento de un sistema de control activo “feedback” (Preumont André – 2006)

En caso de no utilizar un modelo matemático, se puede simplemente elegir parámetros de diseño de control (lógica de acierto y error y lógica difusa) y tratar de satisfacer una lógica razonable. Sin embargo, no existe ninguna garantía ante un número infinito de posibles movimientos como podría ocasionar un sismo.

Cuando se utiliza un modelo matemático, el ingeniero puede idealizar el problema de diseño, por sus siglas en inglés (IDP); el cuál se basa en un modelo matemático de evaluación, sobre el cual se fundamenta el diseño. Una vez que se tiene la clase de modelo, uno puede escoger los parámetros de diseño como: el tipo de actuador, clase de sensores y ubicación y los parámetros de controlador, así de esta manera, garantizar los tipos de límites seleccionados en la respuesta de la estructura (Housner et al. 1997).

Debido a la falta de modelos matemáticos disponibles, este tipo de sistemas pueden tener solución sólo si son modelos simples, es decir lineales.

Es necesario mencionar que el diagrama de la figura 2.12 muestra un sistema de circuito cerrado, donde existirá un tiempo de retraso que debe ser considerado en el diseño del sistema.

Dentro de las aplicaciones de sistemas de control activo, se puede mencionar el primer oscilador de masa activo (AMD) que se utilizó en 1989. Fue instalado por la Corporación Kajima en un edificio de once niveles (Kobori et al. 1991). Se utilizaron dos controladores de masa en la azotea del piso once del edificio Kyobashi Seiwa en Tokio, para reducir las vibraciones producidas por viento y sismos moderados. Los sensores fueron colocados en los niveles seis, once y sótano; la computadora de control fue instalada en el nivel once (Fig. 2.13).

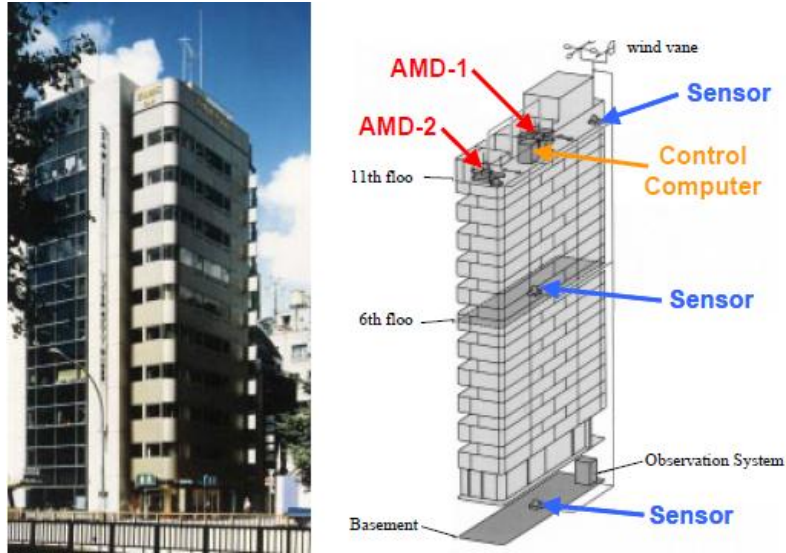


Fig. 2.13 – Dispositivos de control activo, edificio Kyobashi Seiwa, Tokio – Japón (Housner et al. 1997)

Osciladores de masa híbridos (HMD) también han sido instalados en la Shinjuku Park Tower y Yokohama Landmark Tower en Japón (Fig. 2.14). Estos sistemas consisten en una combinación de un oscilador de masa resonante (TMD) y un actuador activo (sistema híbrido); el cual reduce considerablemente la respuesta de la estructura sobre el movimiento del oscilador. En la actualidad, la aplicación de esta técnica se ha incrementado considerablemente, debido a su ahorro económico respecto a un sistema tradicional TMD. En la referencia Spencer y Nagarajaiah (2003) se detallan varias aplicaciones de este tipo de dispositivos de control.

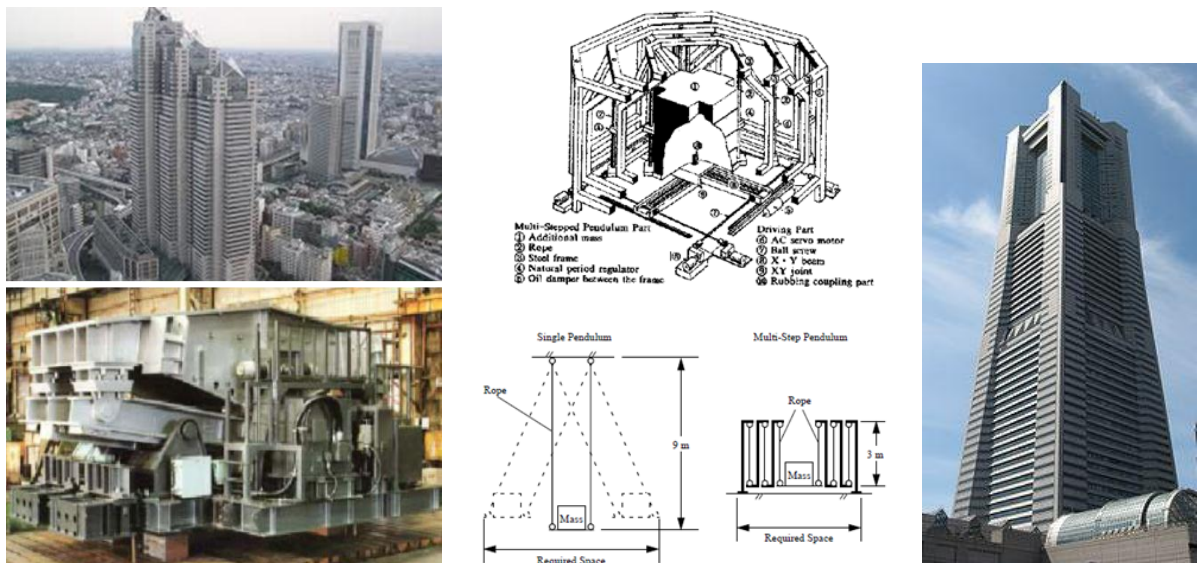


Fig. 2.14 – Dispositivos de control híbrido, edificio Shinjuku Park Tower y Yokohama Landmark (Japón) (Spencer y Nagarajaiah 2003)

Los aisladores de base activos, al igual que los HMD, han tenido amplia aceptación en la industria de la construcción, constituyendo las dos más importantes alternativas de control activo.

2.2.3 SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVO

“Son una clase de sistemas de control activo, en los cuales la cantidad de energía requerida es mucho menor que para un sistema activo convencional. Generalmente este tipo de dispositivos de control no agregan energía mecánica al sistema estructural, pero poseen propiedades que pueden ser controladas óptimamente para reducir las respuestas de la estructura” (Housner et al. 1997). Los sistemas semiactivos son a veces vistos como sistemas pasivos controlables.

Aparentemente, los dispositivos de control semiactivo combinan las mejores características de los sistemas activos y pasivos; y en un futuro no muy lejano, tienen gran probabilidad de ser aceptados por la industria de la construcción, para proteger las estructuras ante cargas dinámicas (sismo y viento).

Los sistemas de control semiactivo proveen la adaptabilidad de un sistema activo, pero sin estar asociadas a grandes cantidades de energía requeridas. Muchos de estos dispositivos pueden operar con baterías en caso de una falla de energía ocasionada por un evento sísmico.

Este tipo de dispositivos no introducen energía al sistema, por lo que, *no son capaces de desestabilizar el sistema estructural*, como un dispositivo activo. Estudios preliminares han mostrado que un sistema semiactivo implantado apropiadamente, tiene mejores desempeños que un sistema pasivo, y pueden llegar a alcanzar y/o sobrepasar el desempeño de un sistema activo.

Dentro de este tipo de sistemas se indican los siguientes:

2.2.3.1 Amortiguadores de orificio variable

El concepto de este tipo de amortiguadores es: controlar una válvula de *orificio variable*, para alterar la resistencia a fluir de un líquido hidráulico, y así conseguir un amortiguamiento variable del dispositivo (Fig. 2.15).

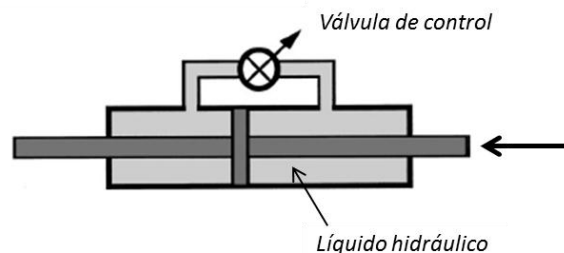


Fig. 2.15 – Dispositivos de control semiactivo – Esquema de un amortiguador de orificio variable

Este tipo de sistemas opera aproximadamente con 50W de potencia. Su aplicación para controlar la vibración de puentes fue propuesta en 1990 por Feng y Shinozuka, y estudios analíticos han sido realizados por varios investigadores (Spencer y Nagarajaiah 2003). En la figura 2.16 se aprecia una aplicación de este tipo de dispositivos en Japón como es el edificio Kajima en Shizuoka, que fue estudiado por Kobori et al. en 1998; Kurata et al. en 1999, 2000, 2002 y por Niwa et al. en el año 2000 (Spencer y Nagarajaiah 2003).

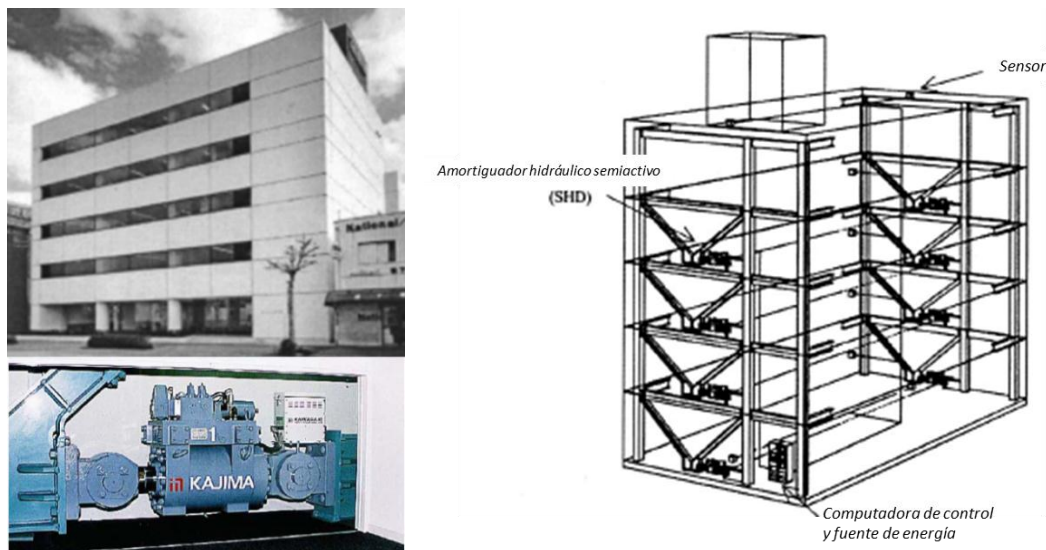


Fig. 2.16 – Edificio Kajima en Shizuoka - Japón (Spencer y Nagarajaiah 2003)

2.2.3.2 Osciladores de masa resonante inteligentes

Muchos autores han estudiado los TMD y su sensibilidad respecto a la relación de frecuencia resonante, por ello se plantearon los osciladores de masa múltiples (MTMD), que tienen ciertas ventajas sobre este efecto. Sin embargo los MTMD no pueden resonar en tiempo real, por ende, no son adaptables.

Una alternativa atractiva son los osciladores de masa resonantes semiactivos (STMD), que tienen ciertas ventajas sobre los TMD. Estos sistemas poseen una rigidez variable que les permite estar en resonancia continua con su frecuencia debido al control en tiempo real, haciendo de esta más robusta a los cambios de rigidez y amortiguamiento.

En 2003, Varadarajan y Nagarajaiah han realizado comparaciones con osciladores de masa resonantes activos, y la principal diferencia es el menor consumo de energía que tienen los STMD. Otros estudios realizados por Caughey y Karyeacis en 1989 y Masri en 2000, han utilizado amortiguadores de impacto semiactivos. Mientras que en 1996, Abe e Igusa estudiaron amortiguadores variables (Spencer y Nagarajaiah 2003).

2.2.3.3 Amortiguadores de fricción variable

Existen varias propuestas de dispositivos que utilizan las fuerzas de fricción para disipar energía en un sistema estructural. Entre las más importantes se mencionan: los dispositivos de fricción variable estudiados por Akbay y Aktan en 1991 y Kannan et al. en 1995, que consiste en un eje que está rígidamente conectado a un sistema de contraviento (Fig. 2.17); la fuerza en la superficie friccionante interior es ajustada en cantidades controlables. En 1993, Feng et al. usaron un soporte fluido semiactivo de fricción controlable, empleado en paralelo a un sistema de aisladores de base. En años recientes, sistemas de fricción variable han sido estudiados por Yang y Agrawal, para mitigar la respuesta sísmica en edificios con comportamiento no lineal (Spencer y Nagarajaiah 2003)

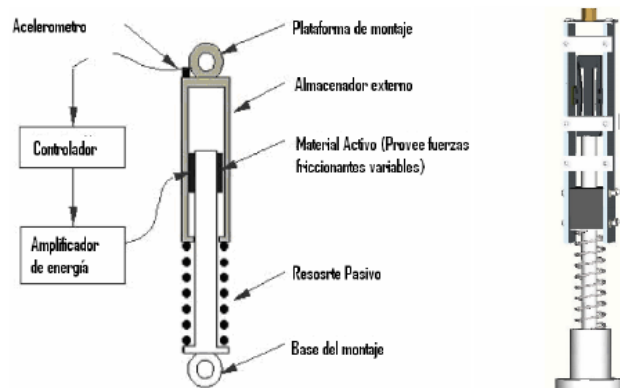


Fig. 2.17 – Sistemas de control semiactivo – Amortiguador de fricción variable (Morales 2007)

2.2.3.4 Amortiguadores con fluidos controlables

Uno de los problemas de muchos dispositivos semiactivos son los componentes mecánicos, ya sea en términos de confiabilidad y mantenimiento. Dentro de los tipos de dispositivos semiactivos, se puede mencionar los que usan líquidos controlables y pasan por un orificio determinado en el amortiguador (Fig. 2.18). Una de las ventajas de este dispositivo es su simplicidad mecánica y que no contienen partes en movimiento aparte del pistón.

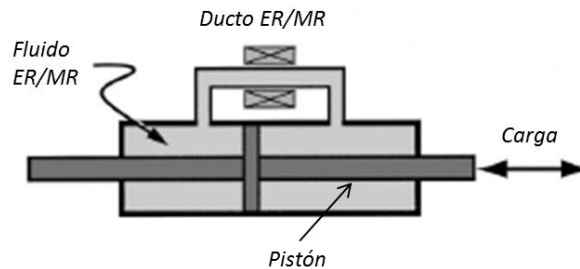


Fig. 2.18 – Sistemas de control semiactivo – Esquema de un dispositivo con fluidos controlables (Spencer 1997)

Dos clases de fluidos han mostrado ser adecuados para el funcionamiento de este tipo de dispositivos: fluidos electrorreológicos (ER) y fluidos magnetorreológicos (MR)

Los fluidos MR han demostrado ser más aplicables en el campo de la ingeniería civil. La principal característica de este tipo de fluidos es: *la habilidad de cambiar su propiedad de fluir, como fluido lineal viscoso a semisólido con resistencia de fluencia controlable, cuando se lo expone a un campo magnético en cuestión de milisegundos* (Spencer y Nagarajaiah 2003).

Los fluidos magnetorreológicos (MR) están compuestos por micro partículas magnéticamente polarizadas, dispersas en un medio portador como mineral o aceite de silicona y pueden operar a temperaturas desde -40°C a 140°C con sólo una pequeña variación en su esfuerzo de fluencia. Además, estos dispositivos pueden ser fácilmente controlados con cantidades de energía pequeñas (menos de 50W), bajo voltaje ($\sim 12\text{--}24\text{ V}$) o suministro de corriente eléctrica de $\sim 1\text{--}2\text{ A}$; claramente estas cantidades de energía pueden ser suministradas por baterías.

Se han realizado pruebas experimentales y modelos analíticos utilizando amortiguadores con fluidos MR. Estos han demostrado desempeños superiores comparados con sistemas de amortiguamiento pasivos, además, de utilizar una fracción de la energía requerida por un dispositivo de control activo. Asimismo, estudios han mostrado que esta tecnología puede ser aplicada en modelos suficientemente grandes, para su aplicación en ingeniería civil (Spencer y Nagarajaiah 2003).

Carlson y Spencer en 1999, Spencer et al. en 1999, y Yang et al. en 2002, han desarrollado y realizado pruebas experimentales de un amortiguador con fluidos MR de 20 ton, el cuál podría ser adecuado para su utilización en estructuras de escala real (Fig. 2.19).

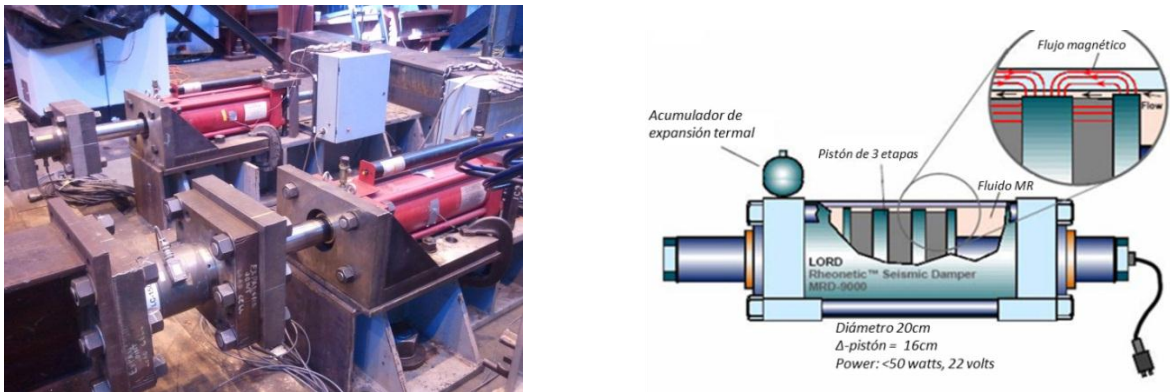


Fig. 2.19 – Pruebas experimentales amortiguador MR de 20ton (Spencer y Nagarajaiah 2003)

En Spencer y Nagarajaiah 2003, se indica que la primera aplicación de amortiguadores con fluidos MR se realizó en 2001, en el Museo Nacional de Ciencias Emergentes e Innovación de Tokio (Fig. 2.20). Dos amortiguadores MR (30ton) son colocados entre el tercer y quinto piso.



Fig. 2.20 – Aplicación de Amortiguadores MR por la empresa Sawan Tekki (Spencer y Nagarajaiah 2003)

En China, se realiza la primera aplicación de amortiguadores con fluidos MR en puentes (Fig. 2.21), que consiste en el mantenimiento del puente Dongting Lake (puente atirantado con cables metálicos). Este puente está sujeto a cargas de viento combinadas con lluvia, que pueden producir el efecto de galopeo de los cables.



Fig. 2.21 –Amortiguadores MR puente Dongting Lake – China (Spencer y Nagarajaiah 2003)

El incipiente amortiguamiento que tienen los cables en este puente, impide la reducción de vibraciones producidas por las condiciones climáticas, lo que puede ocasionar la disminución de la vida útil del cable y la conexión debido a fatiga, o la falla de la protección anticorrosiva.

Dos amortiguadores MR (Lord SD-1005) fueron instalados en cada cable atirantado del puente para reducir sus vibraciones, haciendo un total de 312 amortiguadores sobre 156 cables (Fig. 2.21).

En el presente capítulo se realiza una apreciación global de los diferentes sistemas de control, como estudios previos, pruebas realizadas y sus aplicaciones.

La presente investigación está enfocada a estudiar los sistemas de control semiactivo. Como bien se mencionó, estos sistemas de control prometen tener futuras aplicaciones en ingeniería civil y aceptación por la comunidad ingenieril.

Como la tendencia del diseño de edificios esta inclinada a este tipo de dispositivos, debido a costos y confiabilidad principalmente, se pretende que el presente estudio contribuya futuras investigaciones en el campo de control estructural, utilizando dispositivos de control semiactivo.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE ESTRUCTURAS ACOPLADAS

3.1 GENERALIDADES SOBRE ESTRUCTURAS ACOPLADAS

Acoplar edificios surge como una alternativa interesante para mitigar la respuesta de estructuras ante cargas dinámicas. El concepto fue introducido por Klein en los 70's (Christenson 2001). A través de los años esta técnica ha recibido particular atención en diferentes países.

El concepto de acoplar edificios consiste: que las estructuras ejerzan fuerzas de control una sobre otra, de manera que su resistencia ante cargas dinámicas este dada por el conjunto de los edificios. Si se asume dos estructuras y se las somete a cargas dinámicas, por ejemplo sismos, se puede observar el comportamiento de cada una por separado (Fig. 3.1).

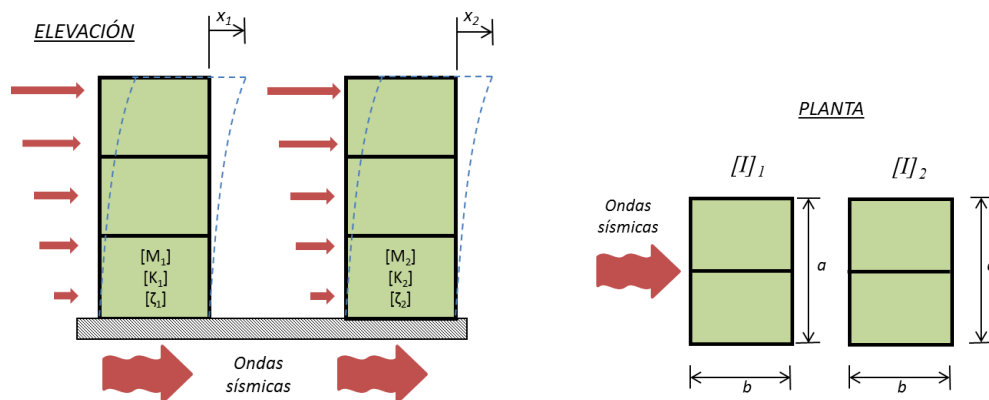


Fig. 3.1 – Estructuras desacopladas

Si se acopla las estructuras mediante elementos estructurales (Fig. 3.2), el comportamiento en conjunto del sistema tendrá mayor rigidez y menores desplazamientos ante cargas dinámicas.

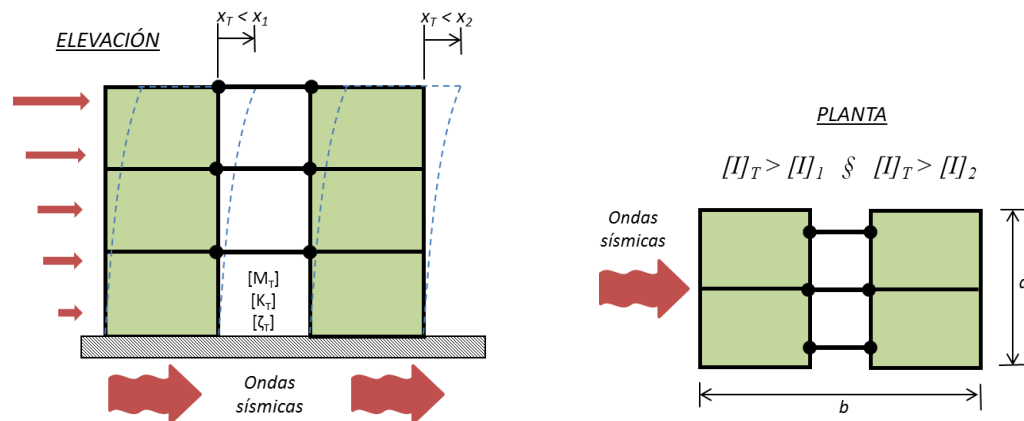


Fig. 3.2 – Estructuras acopladas

Si el acoplamiento de la estructura es con elementos estructurales (vigas de concreto o acero), se dice que el sistema está acoplado con elementos rígidos. En las últimas décadas, se han realizado estudios sobre estos modelos, utilizando diferentes tipos de dispositivos pasivos, activos y semiactivos como enlace entre estructuras. En la presente investigación se estudian los sistemas semiactivos como conector de acoplamiento y se plantean variantes de los estudios ya realizados.

Para comprender los conceptos de los sistemas acoplados, se estudian primeramente modelos de dos grados de libertad.

3.2 MODELOS DE EDIFICIOS DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Para comprender los conceptos de la dinámica estructural, se consideran dos edificios, cada uno modelado como un sistema de un grado de libertad. Se conectan los modelos mediante un dispositivo de acoplamiento pasivo (amortiguador), Fig. 3.3.

Los modelos se examinan y se trata de establecer cómo afecta el dispositivo de acoplamiento en el comportamiento dinámico del sistema.

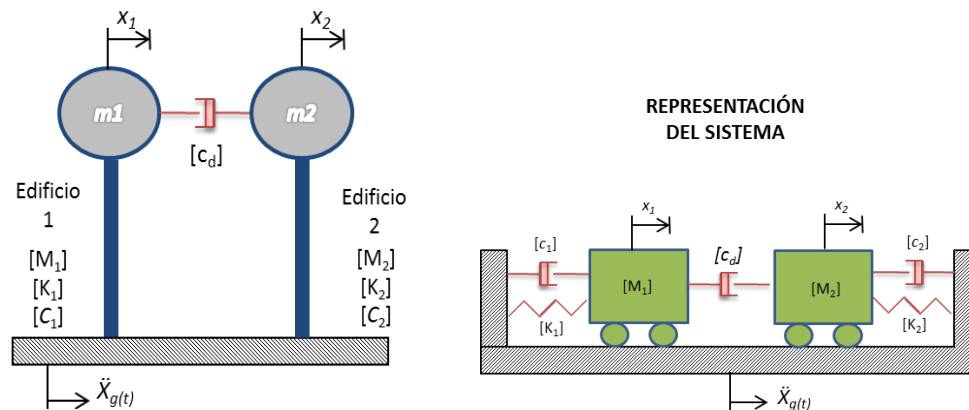


Fig. 3.3 – Sistema de dos grados de libertad (2GDL)

donde la ecuación de movimiento de cada elemento está dada por:

$$m_i \ddot{x} + c_i \dot{x} + k_i x = F_{Amortiguador} + E_{Sismo}(t)$$

Si se representa el sistema en el espacio de estados se tiene:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= A_1 z_1 + B_1 u_1 + E_s \ddot{x}_g \\ \dot{z}_2 &= A_2 z_2 + B_2 u_2 + E_s \ddot{x}_g\end{aligned}\tag{3.1}$$

de igual manera:

$$\begin{aligned}y_1 &= C_1 z_1 \\ y_2 &= C_2 z_2\end{aligned}\tag{3.2}$$

donde los vectores z_1 y z_2 están definidos como:

$$z_1 = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} \quad y \quad \dot{z}_1 = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix}\tag{3.3}$$

$$z_2 = \begin{Bmatrix} x_2 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \quad y \quad \dot{z}_2 = \begin{Bmatrix} \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix}\tag{3.4}$$

Si se considera que el sistema tiene por salidas el desplazamiento, velocidad y aceleración, las matrices y vectores están definidos como:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_i/m_i & -c_i/m_i \end{bmatrix} \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/m_i \end{bmatrix}\tag{3.5}$$

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -k_i/m_i & -c_i/m_i \end{bmatrix}\tag{3.6}$$

* i : representa el número del edificio considerado.

De la figura 3.3 se determina que el valor del vector u_i (fuerza de control) es:

$$u_1 = F_1 = c_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad y \quad u_2 = F_2 = c_d(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)\tag{3.7}$$

La velocidad puede ser definida a partir de la ecuación 3.2 de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= y_1 = T_1 C_1 z_1 \\ \dot{x}_2 &= y_2 = T_2 C_2 z_2\end{aligned}\tag{3.8}$$

donde el vector T_1 y T_2 definen la salida que modifica la respuesta del sistema:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad y \quad T_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad \begin{matrix} \text{Desplazamiento} \\ \text{Velocidad} \\ \text{Aceleración} \end{matrix} \quad (3.9)$$

Introduciendo las ecuaciones 3.7 y 3.8 en la ecuación 3.1:

$$\dot{z}_1 = A_1 z_1 + B_1 c_d (T_1 C_1 z_1 - T_2 C_2 z_2) \quad y \quad \dot{z}_2 = A_2 z_2 + B_2 c_d (-T_1 C_1 z_1 + T_2 C_2 z_2) \quad (3.10)$$

Escrito en forma matricial:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= A_1 z_1 + c_d \begin{bmatrix} B_1 T_1 C_1 & -B_1 T_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + E_s \ddot{x}_g \\ \dot{z}_2 &= A_2 z_2 + c_d \begin{bmatrix} -B_2 T_1 C_1 & B_2 T_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + E_s \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (3.11)$$

Si los edificios están unidos mediante una conexión, entonces el sistema acoplado será uno solo:

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + c_d \begin{bmatrix} B_1 T_1 C_1 & -B_1 T_2 C_2 \\ -B_2 T_1 C_1 & B_2 T_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + E_s \ddot{x}_g \quad (3.12)$$

El primer término de la ecuación 3.12 (matrices A_1 y A_2), define las propiedades dinámicas del sistema, ya que está en función de las rigideces (k_1 y k_2), las masas (m_1 y m_2) y los amortiguamientos (c_1 y c_2) de ambos edificios.

El segundo término de la ecuación 3.12 representa el efecto de la fuerza de control que ejerce un edificio sobre otro, y su efecto sobre las propiedades dinámicas del sistema (matrices A_1 y A_2).

Como el sistema está sujeto a un movimiento de terreno que es el mismo para ambos edificios, se agregó el término $E_s \ddot{x}_g$ en la ecuación 3.12; esto con el fin de diferenciar el término que modifica las propiedades dinámicas debido a la fuerza de acoplamiento (segundo término) y las fuerzas debidas a excitaciones externas como sismos ($E_s \ddot{x}_g$), donde el valor de E_s está dado por:

$$E_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{excitación del terreno})$$

Si se consideran valores paramétricos de la masa, rigidez y amortiguamiento de los edificios:

Estructura	Masa	Rigidez	% de amortiguamiento crítico
Edificio 1	$m_1=10$	20	2.00%
Edificio 2	$m_2=10m_1$	20	2.00%

Con la ayuda de un modelo en Matlab® R2009a se reprodujo el sistema de 2GDL, y al tomar un factor de $\lambda=2$, se obtuvieron las siguientes propiedades dinámicas del sistema.

Estructura	Frecuencia (rad/seg)	Periodo (seg)
Edificio 1	1.414	4.44
Edificio 2	1.000	6.28

Como ambos edificios están conectados entre sí mediante un amortiguador pasivo, la idea es representar cómo afectan los valores de este dispositivo en la respuesta del sistema. Para un valor de $c_d = 0$, se podría entender que los edificios no están acoplados, mientras que para valores altos de c_d , la conexión entre estructuras se hace más rígida.

Por otro lado, también es necesario considerar la variación del coeficiente λ y cómo afecta en el comportamiento del sistema. Al considerar un factor de $\lambda=1$, ambos edificios tienen la misma masa; por tanto, las frecuencias son iguales $\omega_1 = \omega_2$. En estudios anteriores (Christenson 2003), se ha podido ver que la reducción de las respuestas disminuye considerablemente a medida que las frecuencias se igualan. Este fenómeno se comprende como si las estructuras vibraran de manera similar; por tanto, la fuerza que ejerce el conector en cada edificio se anula.

En la siguiente gráfica se aprecia la variación del amortiguamiento del sistema, en función del coeficiente de amortiguamiento c_d normalizado del amortiguador, para diferentes relaciones de masa (λ).

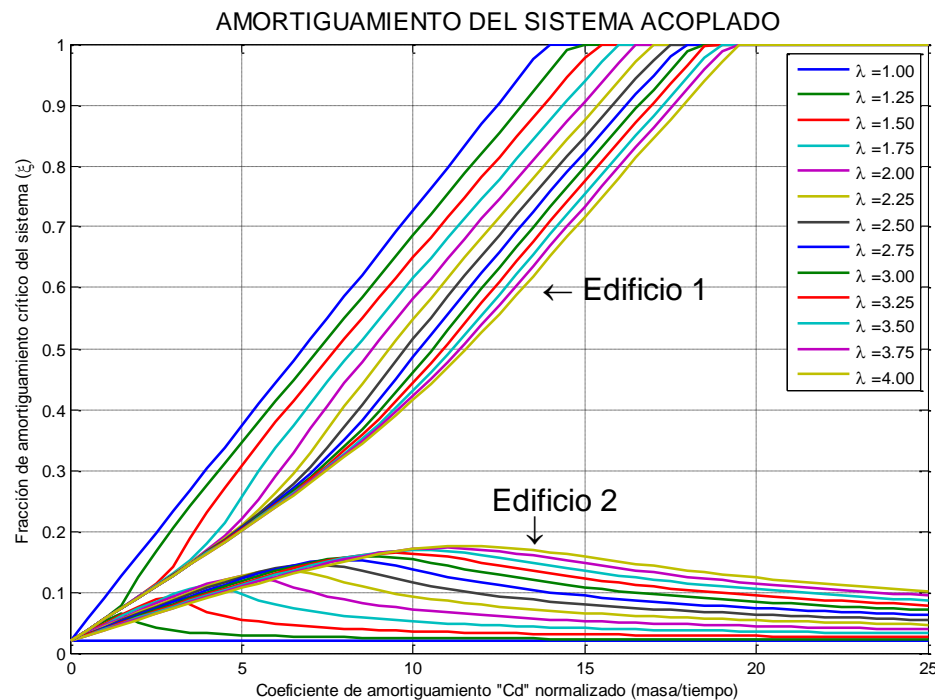


Fig. 3.4 – Variación del amortiguamiento del sistema acoplado

Se observa en la Fig. 3.4 que a medida que el valor del coeficiente de amortiguamiento c_d se incrementa (se hace más rígido), el amortiguamiento del edificio 1 (más pequeño) aumenta progresivamente y se alcanza un valor del amortiguamiento crítico para aproximadamente $c_d=15-20$. De la misma manera ocurre con el edificio 2, pero el incremento no es considerable (aprox. 18% del crítico) y sólo llega hasta un determinado punto, después decrece a pesar de incrementar el valor de c_d . Como el sistema es considerado como uno solo, ya existen dos frecuencias en él; y por tanto, dos modos de vibración que son representados en la Fig. 3.4.

Además, se aprecia la variación del coeficiente λ , que representa la relación de masas (m_2/m_1) y está en función del tamaño de los edificios. Análogamente, se demuestra que la relación de frecuencias ω_1/ω_2 es igual a la raíz cuadrada del coeficiente λ , es decir:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \sqrt{\lambda} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$$

sólo si las rigideces de ambos edificios son iguales, $k_1 = k_2$

A medida que el coeficiente λ incrementa su valor (el edificio 2 aumenta su masa), las frecuencias naturales del sistema tienen valores más alejados entre sí. Esto establece que dos modos de vibración se distinguen en el sistema. Por otro lado, cuando $\lambda=1$ (los edificios son iguales), se aprecia que el incremento de amortiguamiento en el edificio 2 se anula, y sólo un modo de vibración existe en el sistema, ya que ambos edificios vibran con un mismo periodo.

También, se determina cómo influye el coeficiente de amortiguamiento del conector c_d en la respuesta del sistema. En la Fig. 3.5 se observa como diferentes valores c_d reducen la respuesta en desplazamientos de ambos edificios. El sistema fue sometido a una excitación de ruido blanco. Los desplazamientos se obtuvieron para diferentes relaciones de masa (λ).

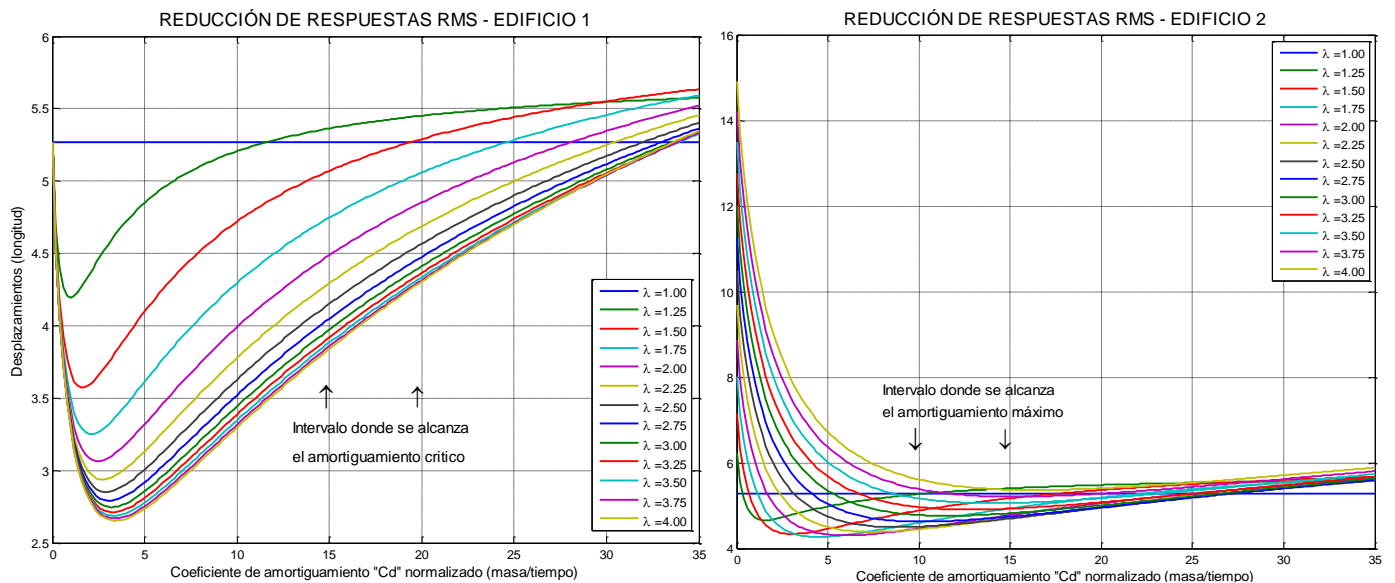


Fig. 3.5 – Desplazamientos del sistema acoplado

De las gráficas se concluye dos aspectos:

- A medida que el coeficiente de amortiguamiento c_d se incrementa (más rígido), los desplazamientos en ambos edificios se reducen hasta cierto punto óptimo. A partir de este valor el incremento del coeficiente aumenta los desplazamientos en ambos edificios. Se pueden determinar valores óptimos de c_d para cada valor λ , y verificar si la máxima disminución de desplazamientos están dentro de los intervalos prácticos posibles de c_d .
- También, se aprecia que a medida que los valores del coeficiente λ disminuyen, la capacidad de control se reduce, es decir, que a medida que las frecuencias de ambos edificios se acercan, la reducción de desplazamientos en ambos edificios decae de manera sustancial hasta quedar nula. Esto muestra que si los edificios son iguales, el acoplar edificios no es muy eficaz.

Para complementar esta última idea se presenta como ejemplo dos estructuras iguales (Fig. 3.6), éstas vibrarán de manera similar, por tanto, la distancia entre dos puntos (A-A') situados a una altura determinada es constante. En este caso; la velocidad en dichos puntos también es la misma. En caso de tener un amortiguador en este punto, no existe variación de la longitud en el amortiguador, por tanto, no existirá fuerza de control en el dispositivo. Como el amortiguador está en función de las velocidades, la fuerza es nula al tener dos velocidades iguales.

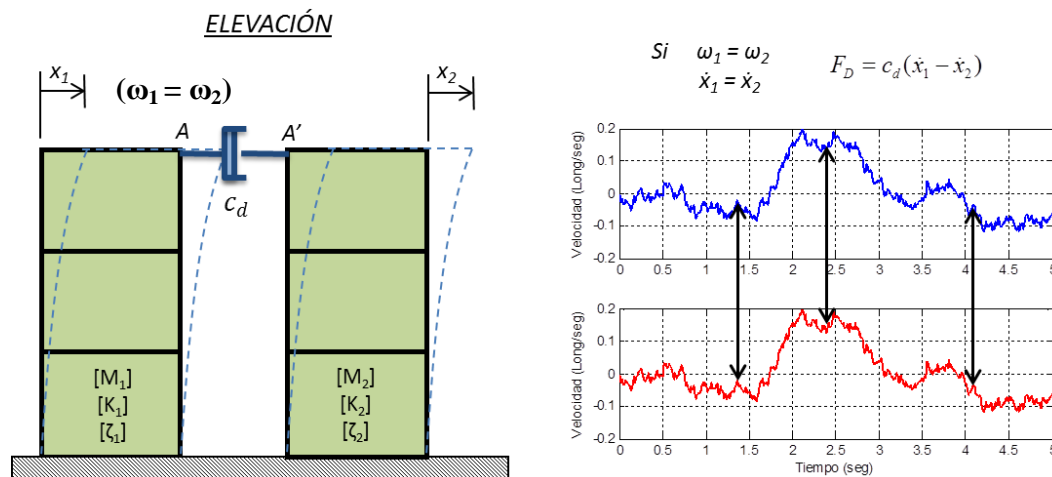


Fig. 3.6 – Estructuras acopladas con frecuencias iguales ($\omega_1 = \omega_2$)

Si se supone que ambas estructuras tienen diferentes frecuencias $\omega_1 \neq \omega_2$, los desplazamientos para puntos a una misma altura A y A' no son iguales, por tanto, la distancia entre estructuras en cada ciclo de oscilación es variable. En este caso las velocidades son diferentes. Como resultado, la fuerza de control ejercida por el amortiguador dependerá de la resta de dichas velocidades (Fig. 3.7).

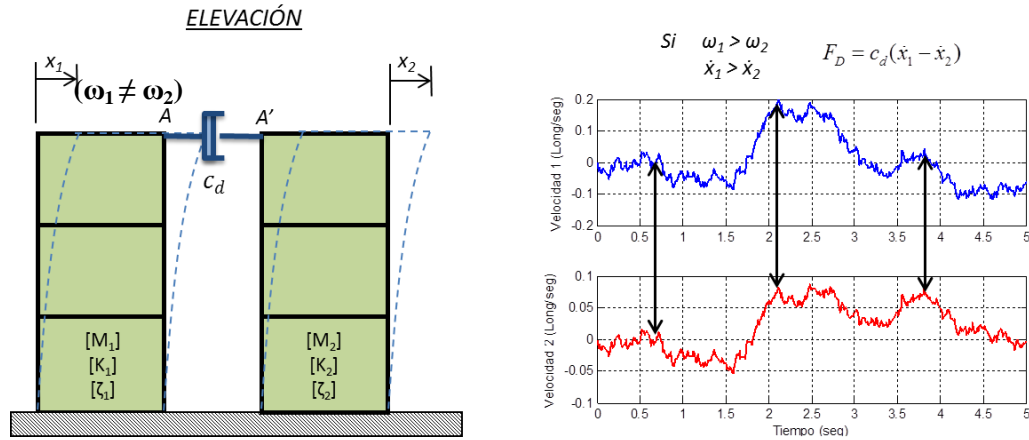


Fig. 3.7 – Estructuras acopladas con frecuencias diferentes ($\omega_1 \neq \omega_2$)

3.3 MODELOS ANALÍTICOS DE ESTUDIO

En las últimas décadas, muchos algoritmos de control y estrategias han sido propuestos por diferentes autores; sin embargo, cada investigador ha utilizado diferentes estructuras y criterios para evaluar sus modelos. Por ello se vio la necesidad de crear modelos estándar para evaluar la validez y efectividad de los diferentes estudios, y comparar las estrategias de control propuestas.

En la presente investigación se utilizan los modelos S.A.C.¹, que representan modelos estándar de edificios para su aplicación en control estructural. Los modelos contemplan dos edificios de tres y nueve niveles, y representan estructuras típicas de baja y media altura que están ubicadas en una región de alta sismicidad, como es Los Ángeles (California). Estos edificios fueron seleccionados porque son modelos de estudio utilizados por la organización S.A.C. y pueden ser comparados con resultados de otros estudios. Entre sus características se tiene (Fig. 3.8 y 3.9):

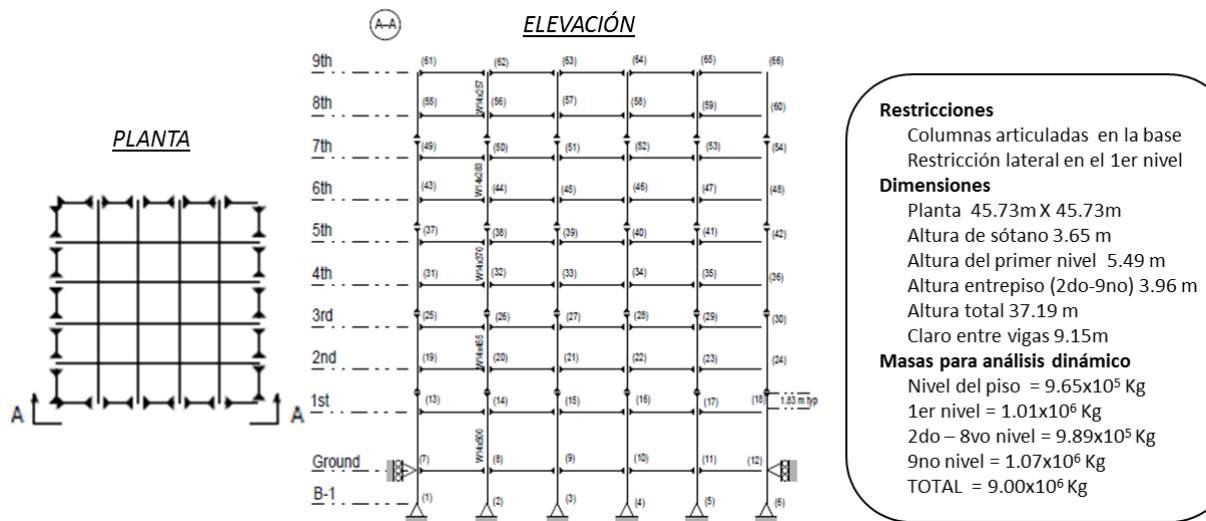


Fig. 3.8 – Características del edificio de nueve pisos (Ohtori et al. 2004)

¹ S.A.C. Unión de tres instituciones: The Structural Engineers Association of California (SEAOC), the Applied Technology Council (ATC) and California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE)

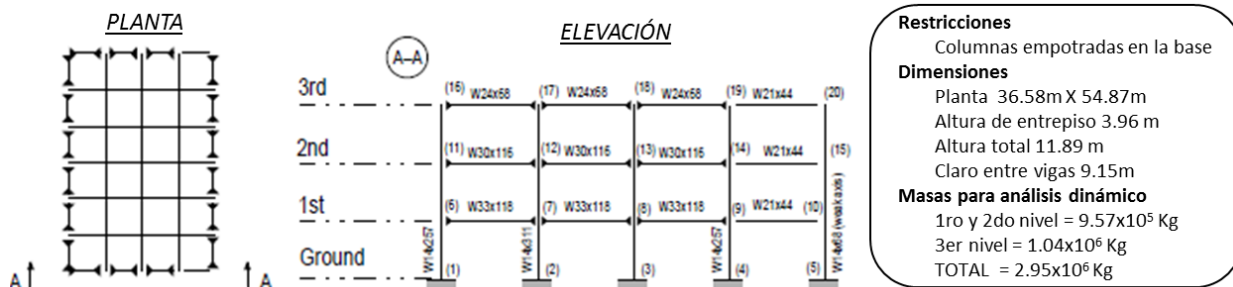


Fig. 3.9 – Características del edificio de tres pisos (Ohtori et al. 2004)

Los edificios cuentan con un sistema de marcos resistentes perimetrales, que brindan resistencia contra fuerzas laterales. Los claros intermedios están compuestos por marcos simples y tienen poca contribución contra cargas laterales.

Ambos edificios cuentan con un sistema de piso de sección compuesta (vigas de acero con losa de piso), que proporciona un diafragma rígido al sistema y por tanto se supone que el plano horizontal es rígido.

Las columnas del edificio de nueve niveles son modeladas como simplemente apoyadas en la base del sótano y restringidas lateralmente en la base del suelo. Esto debido a la cimentación compuesta de muros de concreto perimetrales alrededor del suelo.

Los modelos de estudio no consideran parámetros no lineales en los miembros estructurales. Las vigas y columnas son modelados como elementos de marcos planos (3GDL), de los cuales se determinan las matrices de rigidez y masa para cada estructura. La matriz de amortiguamiento de ambos modelos se determina de acuerdo al criterio de Rayleigh.

Los periodos naturales de cada edificio se muestran a continuación (Fig. 3.10).

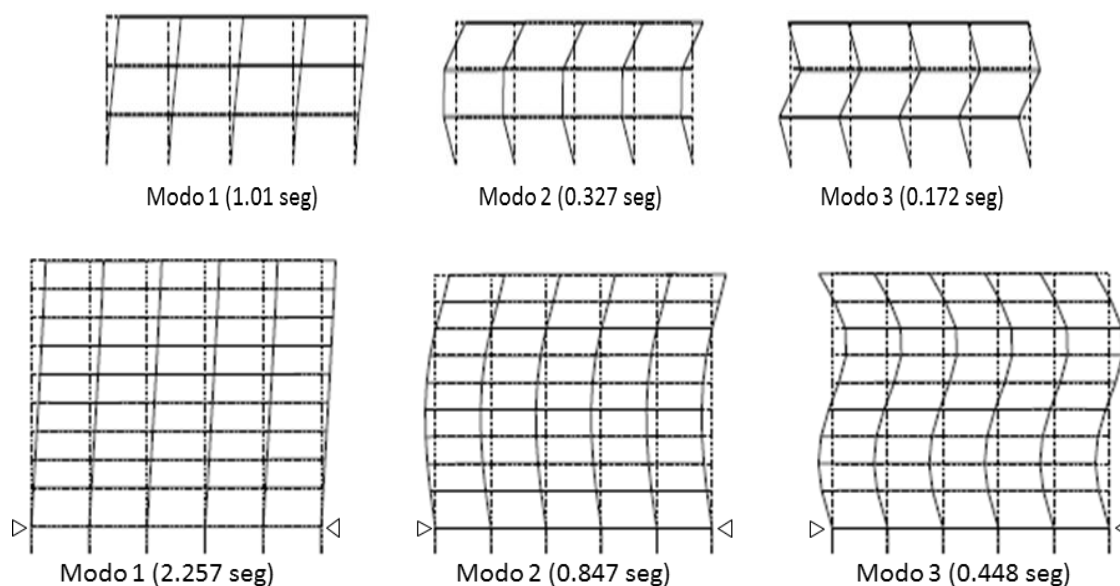


Fig. 3.10 – Periodos fundamentales de las principales formas modales (Ohtori et al. 2004)

Para el estudio de estas estructuras estándar y el uso de dispositivos de control en ellas, es necesario definir los grados de libertad que consideran los algoritmos elaborados para su análisis.

En el capítulo cuatro se definen las matrices de cada sistema representadas en el estado de espacios (edificio de tres y nueve niveles); y para comprender la influencia que tienen los dispositivos de control sobre los diferentes grados de libertad; es necesario definir estos (Fig. 3.11).

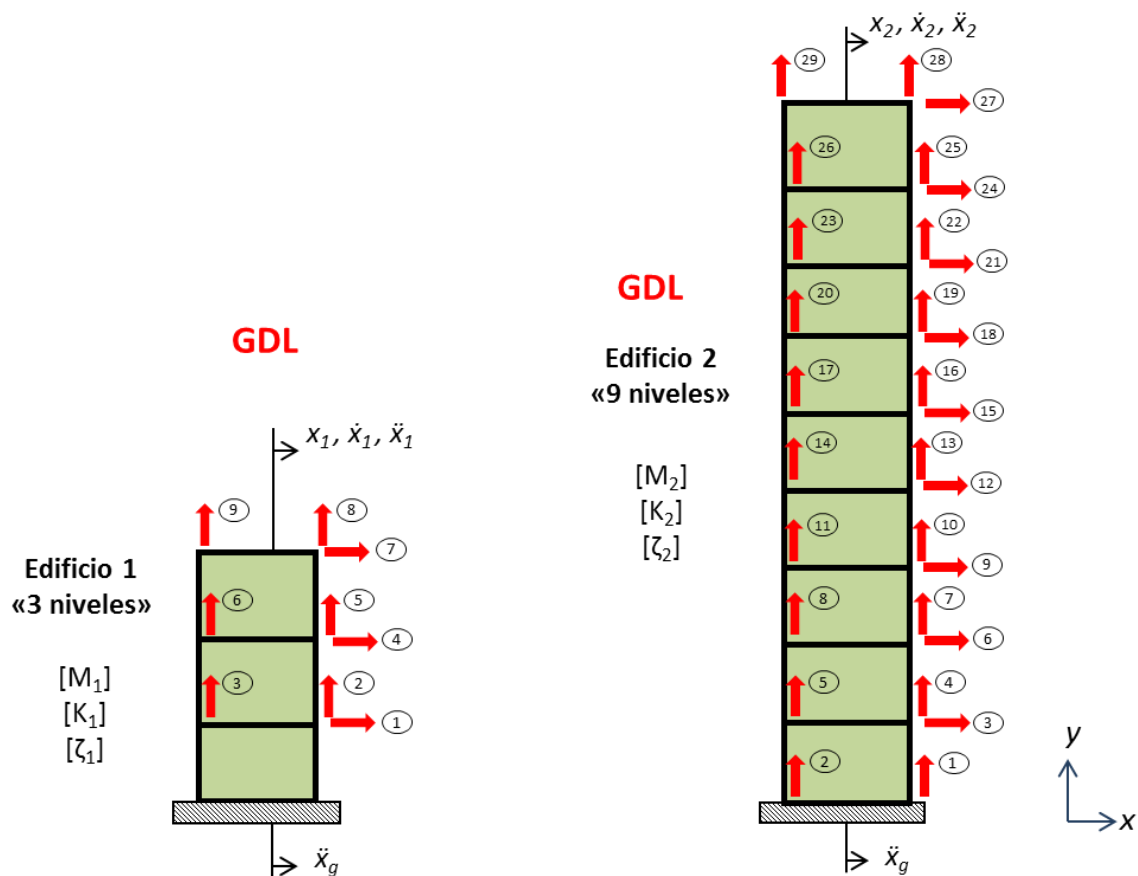


Fig. 3.11 – Grados de libertad considerados en los modelos de estudio

Los códigos realizados en el programa Matlab® 2009, consideran los grados de libertad de la figura anterior, que representan un marco perimetral resistente de cada modelo. Las matrices de rigidez, masas y amortiguamientos de cada marco están ligadas con estos GDL.

3.4 ESTUDIOS DINÁMICOS DE CADA ESTRUCTURA (TRES Y NUEVE NIVELES)

Para entender los conceptos de estructuras acopladas, es necesario comprender como los sistemas de control (pasivos, activos y semiactivos) modifican las propiedades de un sistema.

En el presente punto se coloca un amortiguador en el último nivel de cada estructura (edificio de tres y nueve niveles Fig. 3.12), y se modifican las propiedades del dispositivo; de esta manera, se observará cómo se afectan las propiedades del sistema.

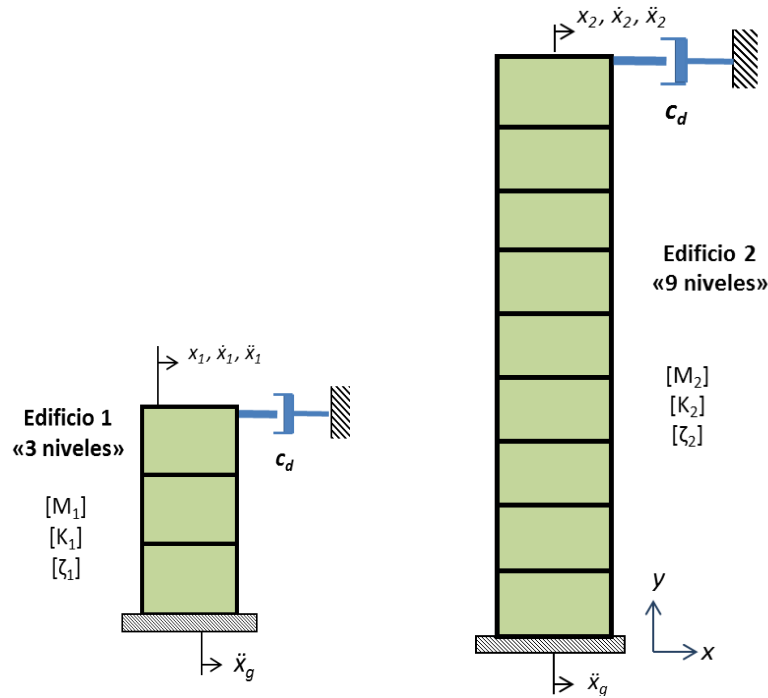


Fig. 3.12 – Modelos analíticos de estudio (edificios de tres y nueve niveles)

En la figura 3.13, se presenta la variación del porcentaje de amortiguamiento crítico del sistema con respecto al valor del coeficiente de amortiguamiento (c_d) del amortiguador se incrementa.

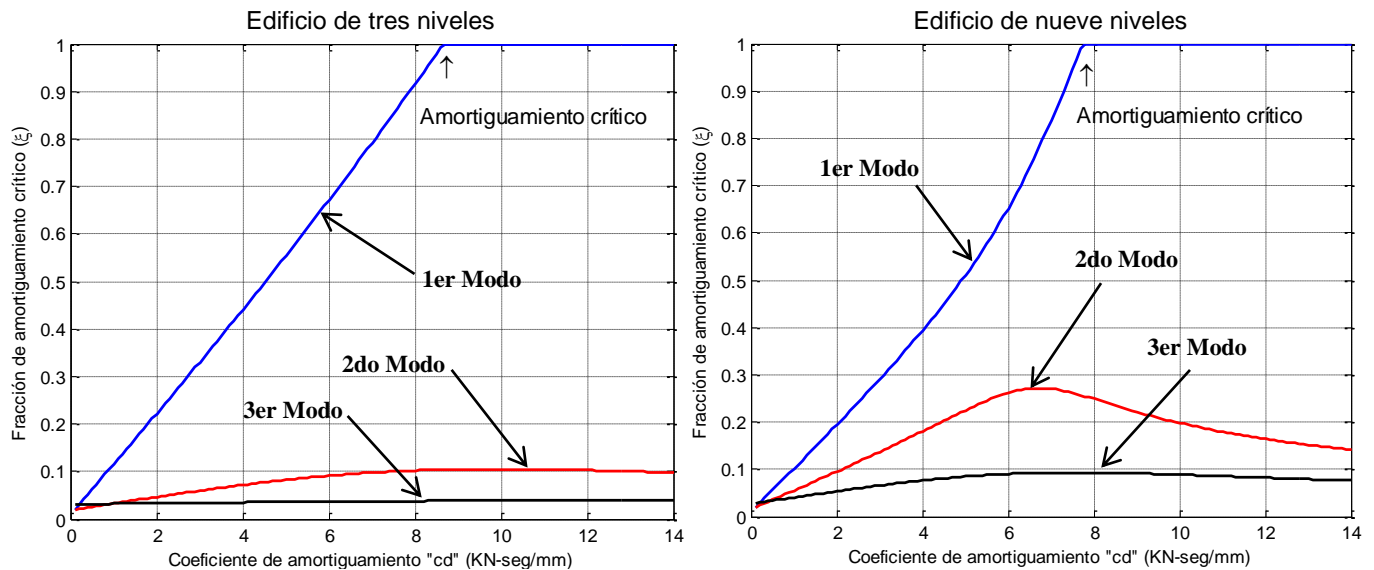


Fig. 3.13 – Variación del porcentaje de amortiguamiento crítico del sistema (Edificio de tres y nueve niveles)

De la gráfica anterior, se observa cómo el amortiguador afecta el porcentaje de amortiguamiento del sistema. Especialmente el primer modo se ve afectado, mientras que en los modos dos y tres su incidencia no es considerable. También, se aprecia que con un valor aproximado de $c_d=8.7KN-seg/mm$ se alcanza un amortiguamiento crítico en el edificio de tres niveles; mientras que para el edificio de nueve niveles se alcanza un valor de ζ crítico con un $c_d=7.8KN-seg/mm$.

Si se somete al sistema bajo una excitación de ruido blanco (excitar todas las frecuencias con una amplitud constante), se observa como los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del último nivel de cada edificio son afectadas, a medida que el coeficiente de amortiguamiento (c_d) se incrementa (Fig. 3.14 y 3.15). Se determinan las respuestas durante un tiempo de 50 seg. y para diferentes valores de c_d . Para $c_d=0.01$ KN-seg/mm (pequeño), $c_d=1$ KN-seg/mm (intermedio) y cuando $c_d=10$ KN-seg/mm el sistema alcanza un amortiguamiento crítico.

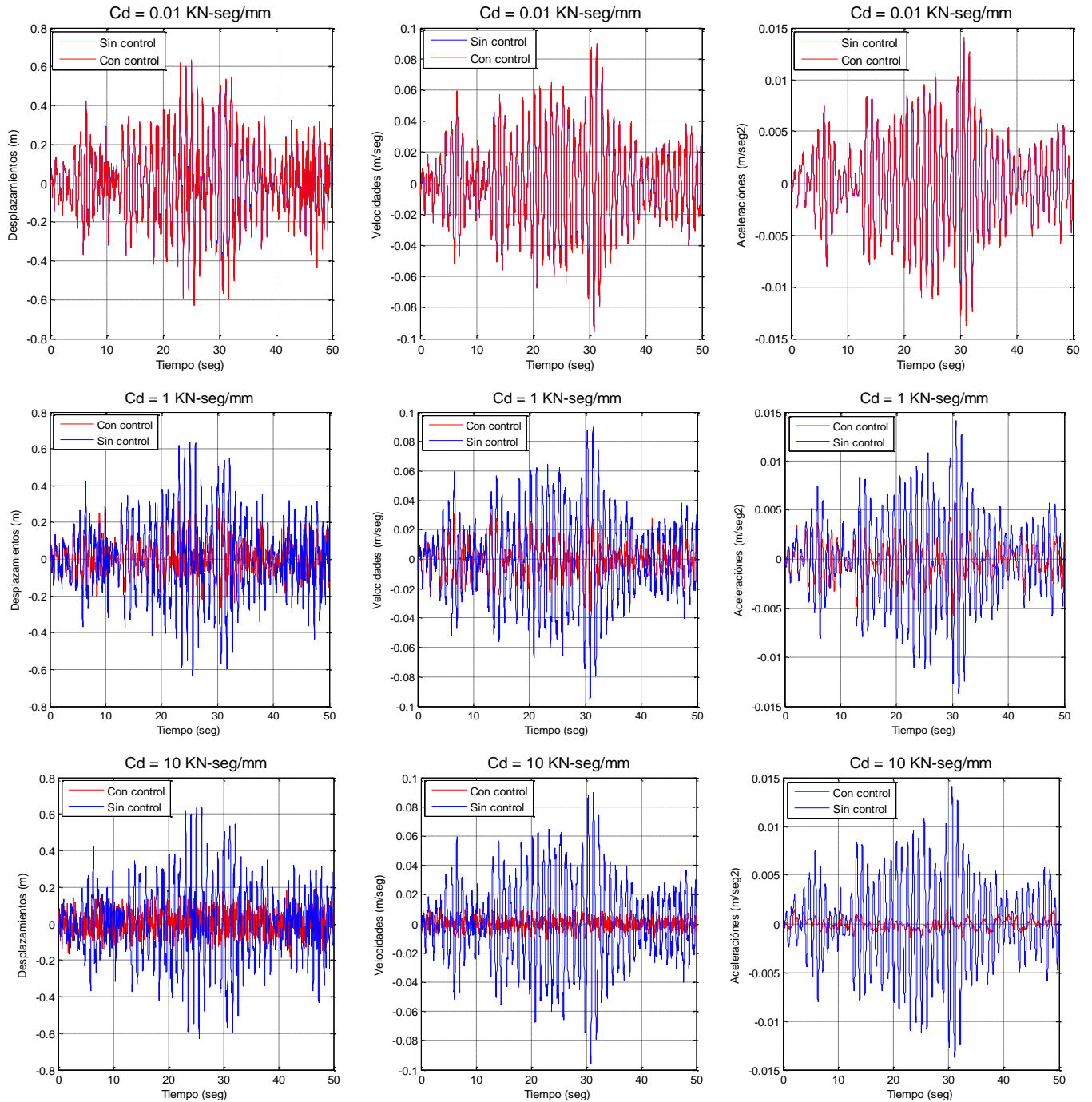


Fig. 3.14 – Respuestas en desp., vel. y acel. para diferentes valores de c_d (último nivel edificio de tres niveles)

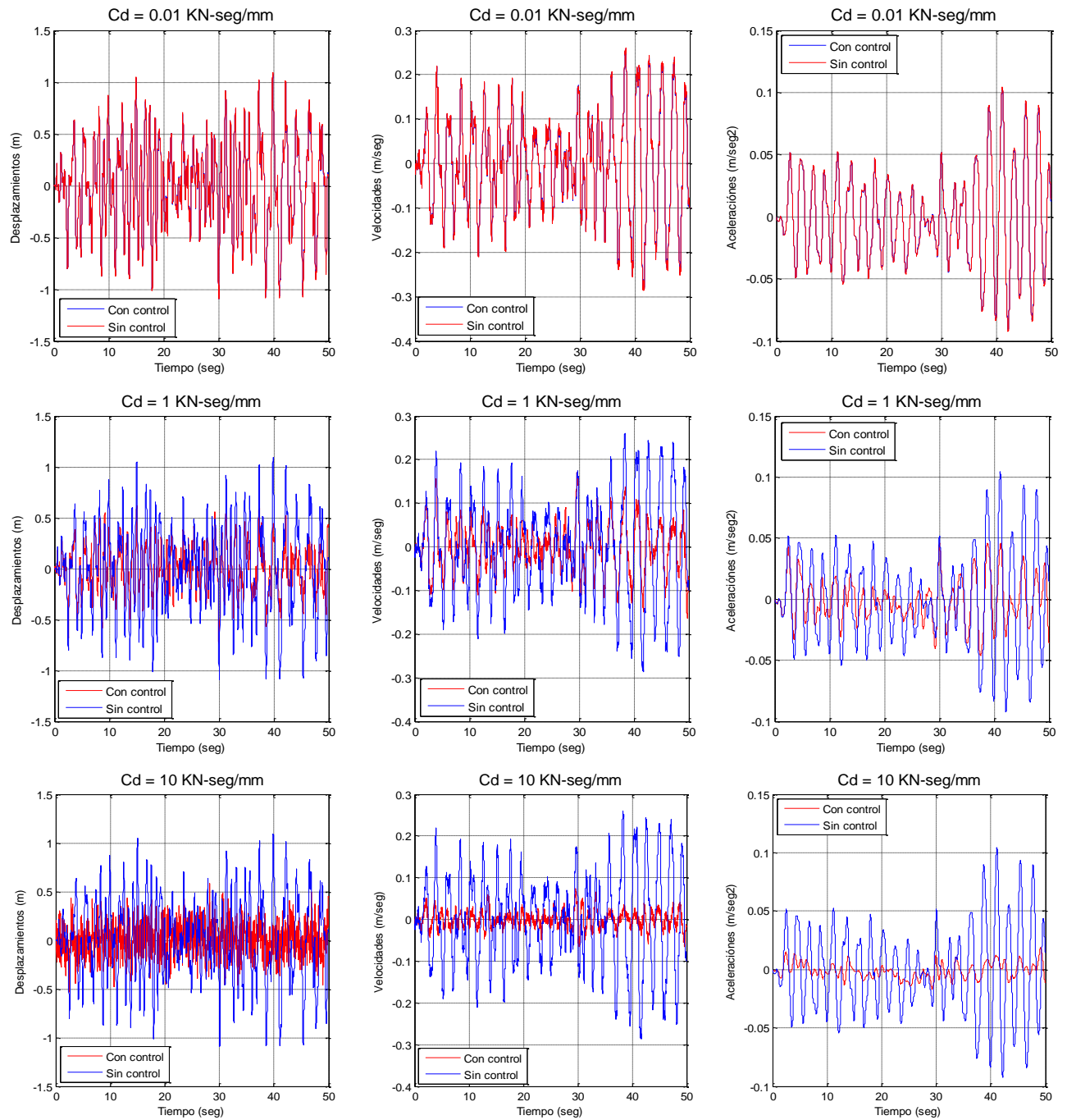


Fig. 3.15 – Respuestas en desp., vel. y acel. para diferentes valores de c_d (último nivel edificio de nueve niveles)

En las gráficas se aprecia que para diferentes valores de c_d (coeficiente del amortiguador), las respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones son reducidas considerablemente. Esto demuestra que el uso de dispositivos de control, puede ayudar a reducir las respuestas de una estructura. Se observa que para valores pequeños de c_d , no se logra reducir las respuestas, mientras que para valores altos las respuestas son reducidas progresivamente. Más adelante se estudian los intervalos prácticos del valor de c_d de los dispositivos de control que se utilizarán.

Para ver más claramente este punto, se determinan las respuestas R.M.S. (media de las raíces cuadradas) en función del coeficiente de amortiguamiento del amortiguador. (Fig. 3.16 y 3.17).

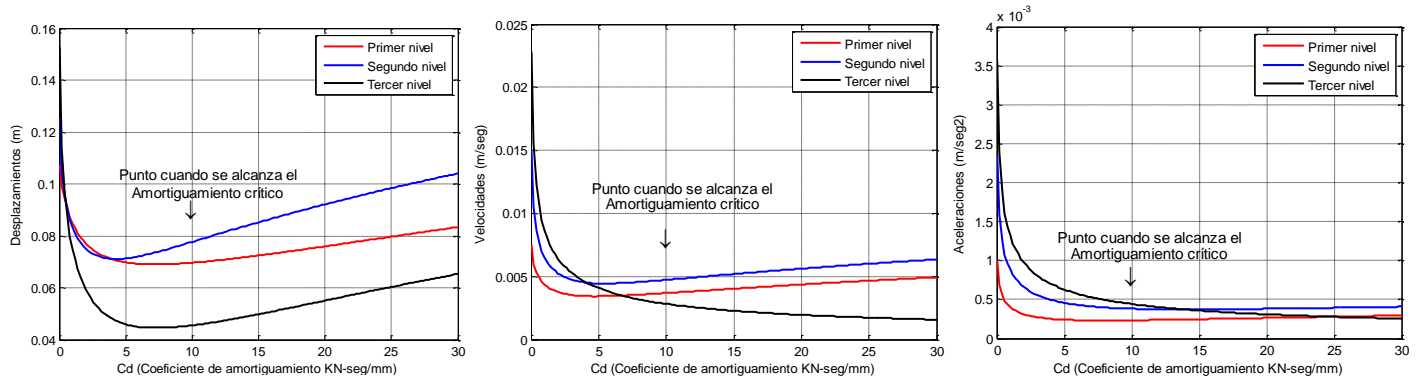


Fig. 3.16 – Respuestas R.M.S. para diferentes valores de c_d (Edificio de tres niveles)

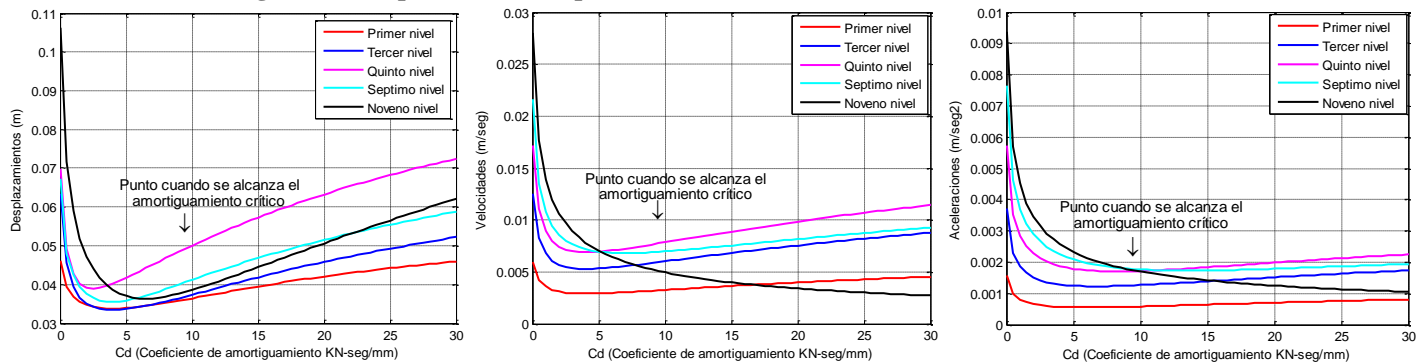


Fig. 3.17 – Respuestas R.M.S. para diferentes valores de c_d (Edificio de nueve niveles)

De la misma manera que el modelo de 2GDL, se obtienen las respuestas mínimas hasta cierto valor óptimo de c_d ; sin embargo, a medida que el valor del coeficiente de c_d aumenta, las respuestas se incrementan y la capacidad de control disminuye.

Finalmente, en las figuras 3.18 y 3.19 se aprecia como varían los primeros tres modos de las estructuras de tres y nueve niveles respectivamente, para diferentes valores del coeficiente c_d .

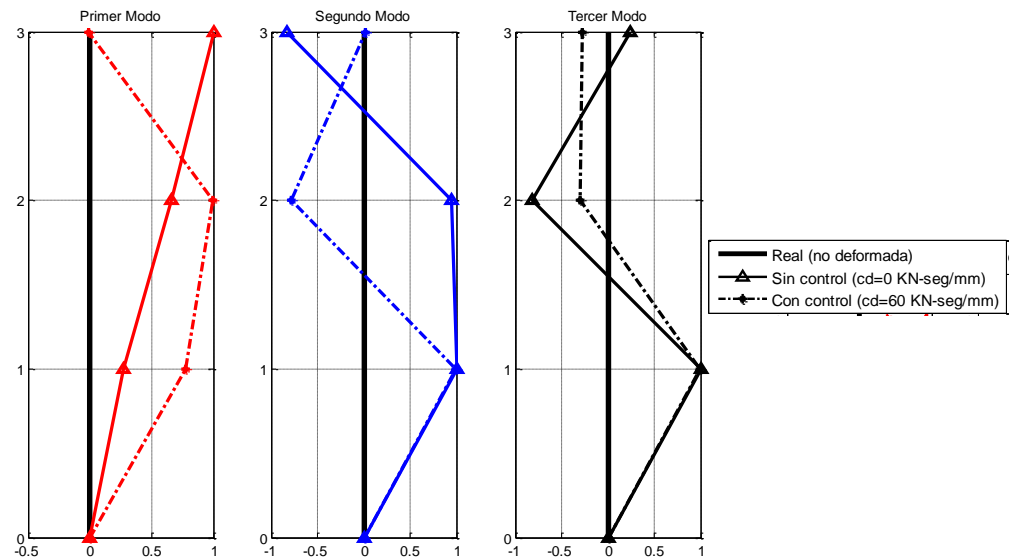


Fig. 3.18 – Formas modales para diferentes valores de c_d (Edificio de tres niveles)

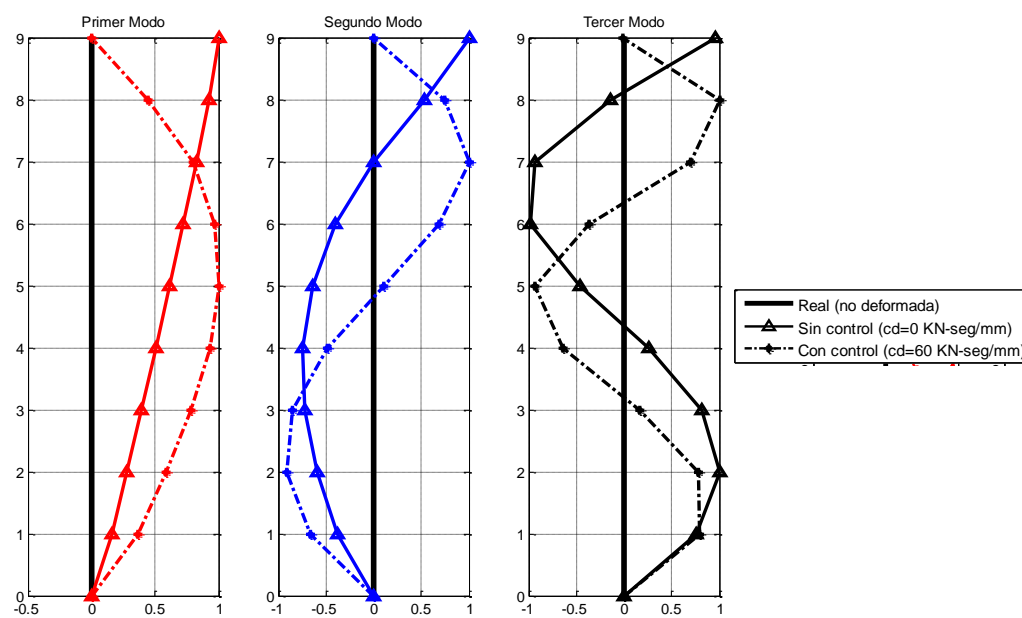


Fig. 3.19 – Formas modales para diferentes valores de c_d (Edificio de nueve niveles)

De las figuras anteriores se concluye que: las formas modales de cada edificio cambian para diferentes valores del coeficiente de amortiguamiento c_d .

A medida que c_d se incrementa, se entiende que ambos edificios se encuentran restringidos al movimiento horizontal en su base y último nivel, esto explica que la primera forma modal cambie su distribución en cada nivel. A medida que c_d tiene valores grandes (cuando el amortiguamiento crítico), los edificios se comportan como vigas simplemente apoyadas.

Cuando el valor de c_d es igual a cero, el amortiguador en el último nivel no opone ninguna resistencia al movimiento, por tanto, los edificios no tienen ninguna restricción en el último nivel, de esta manera las formas modales tienen su máximo desplazamiento en el último nivel (Fig. 3.18 y 3.19). De manera práctica, se puede decir que el edificio actúa como una viga en cantiléver.

En el presente capítulo se realizan estudios sobre modelos de 2GDL y sobre los modelos estándar de tres y nueve niveles. Con la ayuda de la plataforma SIMULINK del programa MATLAB® R2009a, se implantan dispositivos de control sobre los diferentes modelos, y se determina cómo las propiedades dinámicas de los modelos cambian con respecto a diferentes parámetros.

Para simular movimientos de terreno, mediante la plataforma SIMULINK, se introducen excitaciones de ruido blanco sobre los diferentes modelos. De esta manera también se observa como las propiedades del sistema y las respuestas del mismo se afectan por los dispositivos de control implantados.

Con los conceptos y procedimientos utilizados en el presente capítulo, se tienen las herramientas suficientes para acoplar los edificios y realizar los algoritmos de control, que son parte de los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS DE CONTROL EN ESTRUCTURAS ACOPLADAS

4.1 INTRODUCCIÓN

En capítulos anteriores se observó que el acoplar edificios resulta una alternativa eficaz para absorber las vibraciones producidas por las cargas dinámicas (sismo y viento). Sin embargo, surgen muchas cuestionantes relacionadas con el tipo de acoplamiento que es necesario para obtener resultados óptimos.

Luco y De Barros (1998), determinan mediante ensayos experimentales la cantidad requerida de elementos pasivos para su uso como dispositivo de acoplamiento. También, Xu et al. y Ko et al. en 1999 determinan la mejor ubicación de los dispositivos pasivos de acoplamiento (Christenson 2001).

En el presente capítulo se presentan estudios sobre la mejor ubicación de los dispositivos de control, y la cantidad adecuada para su utilización en edificios acoplados. Para ello se usan dispositivos de control pasivos (amortiguadores viscosos), en diferentes niveles de ambos modelos (edificios de tres y nueve niveles).

En el capítulo anterior se pudo observar como las formas modales de cada estructura son modificadas a medida que el valor de c_d variaba. Estas formas modales son la proyección de su componente real sin considerar su componente imaginaria. En el presente capítulo se realiza una

diferenciación entre las formas modales reales y complejas, que están en función del amortiguamiento suplementario del sistema.

De la misma manera que en el capítulo 3, se utiliza la plataforma SIMULINK del programa Matlab® 2009a, para determinar la variación de las propiedades dinámicas del sistema a medida que las características del dispositivo de acoplamiento son modificadas.

4.2 SISTEMAS DE EDIFICIOS ACOPLADOS

De la misma manera que en los modelos de 2GDL, se pueden acoplar las estructuras S.A.C. (Fig. 4.1), considerando que el grado de complejidad será mayor, y las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento tendrán más términos.

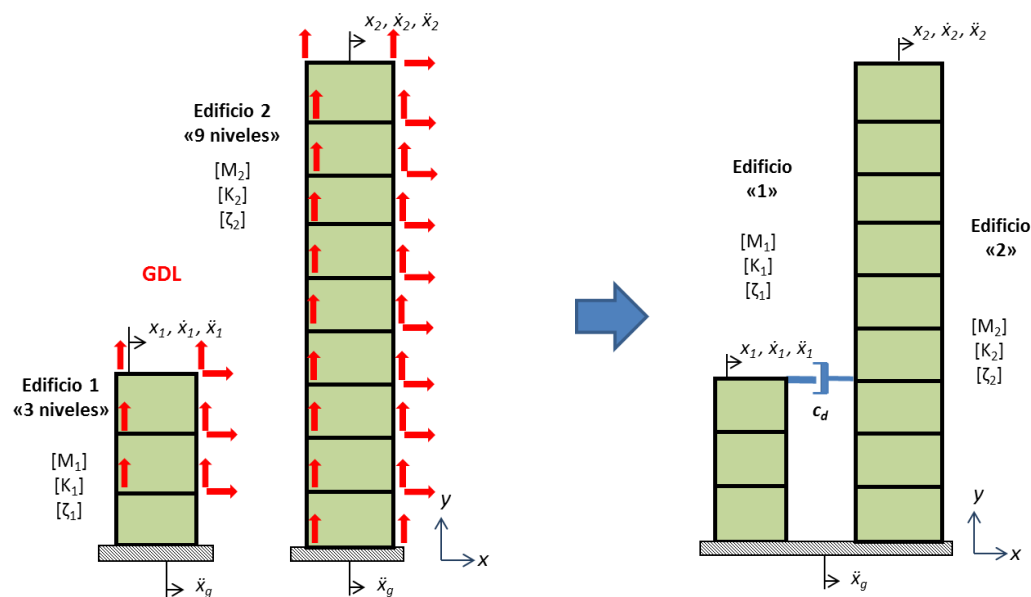


Fig. 4.1 – Modelo de edificios acoplados

El diagrama de retroalimentación del sistema tiene la siguiente forma:

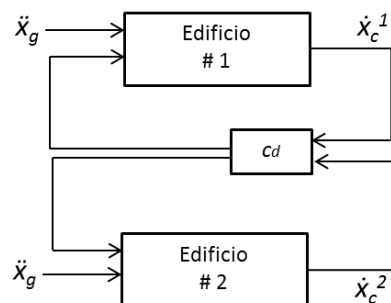


Fig. 4.2 – Diagrama del sistema (feedback)

dónde:

\dot{x}_c^1 = Velocidad del nivel donde se encuentra el dispositivo de control, edificio 1 (tres niveles)

\dot{x}_c^2 = Velocidad del nivel donde se encuentra el dispositivo de control, edificio 2 (nueve niveles)

La representación en el espacio de estados del sistema está dada por las siguientes ecuaciones, expresadas en forma matricial.

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + c_d \begin{bmatrix} B_1 T_1 C_1 & -B_1 T_2 C_2 \\ -B_2 T_1 C_1 & B_2 T_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + E_s \ddot{x}_g \quad (3.12)$$

El número de GDL's (Fig. 3.10 y 4.1) determina el orden de las matrices A_i , B_i , y C_i de cada estructura. En el caso de la matriz A_i , su orden está definido de $2n \times 2n$, la matriz B_i es de orden $2n \times q$ y C_i de orden $m \times 2n$; donde n representa los grados de libertad de cada modelo, q el número de excitaciones externas que actúan sobre cada estructura y m las salidas que se decida considerar. En el presente estudio se consideran desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada nivel, dónde:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & & & 1 & & \\ & \cdot & & & \cdot & \\ & & \cdot & & & \\ & & & 0 & & 1 \\ -K_1/M_1 & & & & -C_1/M_1 & \end{bmatrix}$$

A_1 = Propiedades dinámicas edificio 1 (18x18)
 K_1 = Matriz de rigideces edificio 1 (9x9)
 M_1 = Matriz de masas edificio 1 (9x9)
 C_1 = Matriz de amortiguamiento edificio 1 (9x9)

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & & & 1 & & \\ & \cdot & & & \cdot & \\ & & \cdot & & & \\ & & & 0 & & 1 \\ -K_2/M_2 & & & & -C_2/M_2 & \end{bmatrix}$$

A_2 = Propiedades dinámicas edificio 2 (58x58)
 K_2 = Matriz de rigideces edificio 2 (29x29)
 M_2 = Matriz de masas edificio 2 (29x29)
 C_2 = Matriz de amortiguamiento edificio 2 (29x29)

En el presente capítulo se explica cómo la posición del amortiguador, ya sea se ubique en el primer, segundo o tercer nivel de cada estructura, modifica el comportamiento de los GDL horizontales de los modelos. Estos GDL's son los que definirán los términos de las matrices B_1 , B_2 (Ec. 4.1), D_1 y D_2 (Ec. 4.2).

El número de GDL's también determinará el orden de las matrices A_i , B_i , y C_i de cada estructura.

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ -1/M_1 \end{bmatrix}$$

B_1^* = Excitación producida por el amortiguador edificio 1 (18x1)

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ -1/M_2 \end{bmatrix} \quad B_2^* = \text{Excitación producida por el amortiguador edificio 2 (58x1)}$$

* Los valores B_1 y B_2 están relacionados con los grados de libertad que se modificarán. Para el edificio de tres niveles, el GDL horizontal del 3er nivel será modificado (en caso de tener un amortiguador en la azotea), y corresponde al GDL No7; mientras que para el edificio de nueve niveles, el GDL horizontal del 3er nivel será modificado y corresponde al GDL No10 (Fig. 3.10)

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & & & & 0 \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ 0 & & & & 1 \\ -K_1/M_1 & & & & -C_1/M_1 \end{bmatrix} \quad C_1 = \text{Matriz de salida de respuestas edificio de tres niveles (9x18)}$$

El arreglo de la matriz C_1 tiene como salidas los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada nivel.

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & & & & 0 \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ 0 & & & & 1 \\ -K_2/M_2 & & & & -C_2/M_2 \end{bmatrix} \quad C_2 = \text{Matriz de salida de respuestas edificio de nueve niveles (27x58)}$$

El arreglo de la matriz C_2 tiene como salidas los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada nivel.

Como la contribución del amortiguador genera una fuerza que está en función de la velocidad (Eq. 3.5), los vectores T_1 y T_2 modifican la matriz C_1 y C_2 , de manera, que la contribución de la fuerza está relacionada con la velocidad del nivel donde se encuentra el amortiguador. En caso de que el dispositivo de control se encuentre en la azotea del edificio 1 y en el tercer nivel del edificio 2, los vectores T_1 y T_2 tendrán las siguientes formas:

$$T_1 = \underbrace{[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]}_{\text{Desplazamientos} \quad \text{Velocidades} \quad \text{Aceleraciones}} \quad T_1 = \text{Vector de participación del amortiguador (1x9)}$$

Valor positivo en la velocidad del nivel 3 (Edificio 1)

$$T_2 = \underbrace{[0 \ \dots \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ \dots \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ \dots \ 0]}_{\text{Desplazamientos} \quad \text{Velocidades} \quad \text{Aceleraciones}} \quad T_2 = \text{Participación del amortiguador (1x27)}$$

Valor positivo en la velocidad de nivel 3 (Edificio 2)

En el capítulo 3, se definieron las matrices del sistema representadas en el espacio de estado. En el presente capítulo, de igual manera las ecuaciones están representadas:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= A_1 z_1 + B_1 u_1 + E \ddot{x}_g \\ \dot{z}_2 &= A_2 z_2 + B_2 u_2 + E \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (4.1)$$

De igual manera:

$$\begin{aligned} y_1 &= C_1 z_1 + D_1 u_1 \\ y_2 &= C_2 z_2 + D_2 u_2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Los términos D_1 y D_2 en la ecuación 4.2, representan las componentes de excitación externa y están definidos de la siguiente manera:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 \\ 0 & 1/M_1 \end{bmatrix} \quad D_1 = \text{Componentes de excitación externa edificio 1 (9x2)}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 \\ 0 & 1/M_2 \end{bmatrix} \quad D_2 = \text{Componentes de excitación externa edificio 2 (9x2)}$$

Las columnas de las matrices D_1 y D_2 , representan el número de excitaciones sobre el sistema. En este caso sólo existen dos, una debida al ruido blanco o movimiento del terreno (columna de ceros) y la otra debida a la fuerza producida por el amortiguador. Si existe un amortiguador en cada nivel, la matriz tendrá cuatro columnas, una debido al movimiento del terreno y tres columnas debidas a los amortiguadores en los tres primeros niveles de cada estructura.

4.3 UBICACIÓN ÓPTIMA DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

Una vez realizados los modelos de ambos edificios, y su representación en el espacio de estados, se acoplan los edificios y modifican las propiedades del dispositivo de control. La interrogante a responder sería: ¿Cuál es la mejor ubicación del amortiguador para obtener un control adecuado?

Para ello, se realizaron tres modelos considerando un amortiguador en diferente nivel (Fig. 4.3)

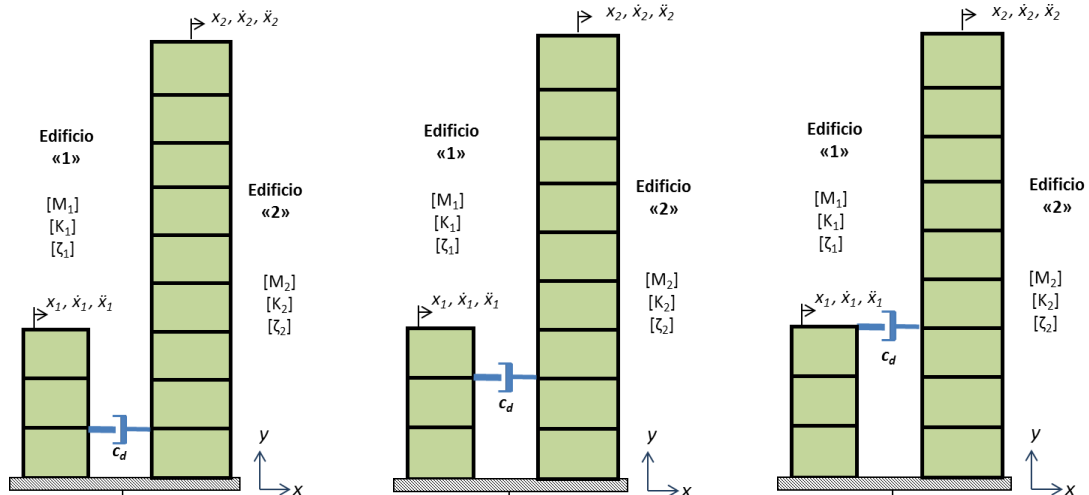


Fig. 4.3 – Modelos utilizados para determinar la mejor ubicación del dispositivo de control

Para los modelos estudiados, se determinó como se incrementa el amortiguamiento del sistema, a medida que el valor de c_d (coeficiente de amortiguamiento del dispositivo) varia (Fig. 4.4)

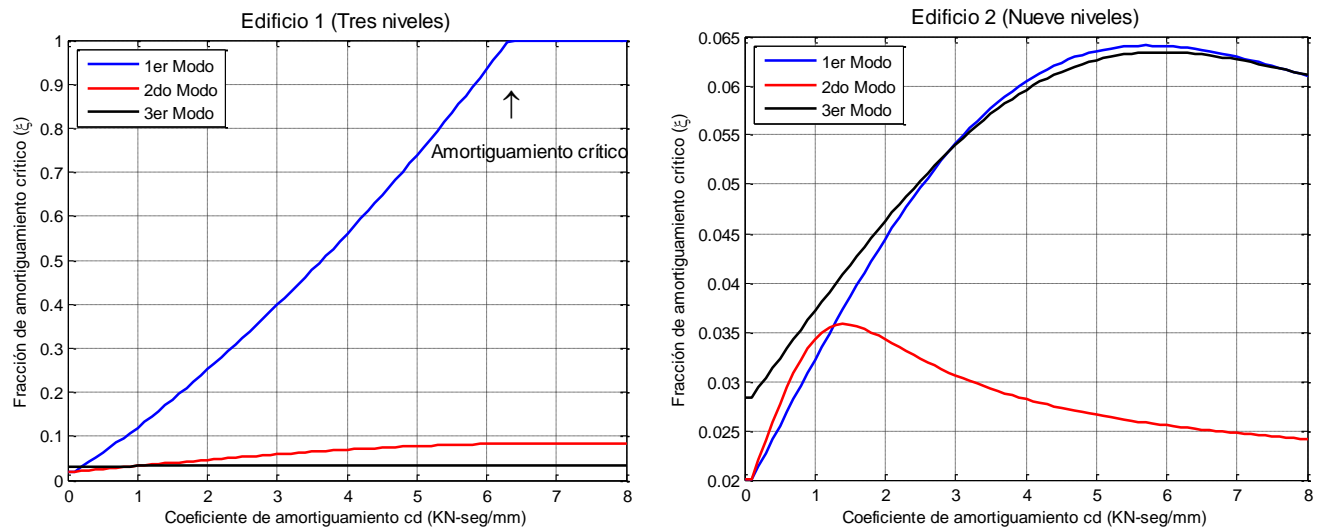


Fig. 4.4 – Amortiguamiento suplementario de las estructuras Vs. Coeficiente de amortiguamiento c_d

En las gráficas anteriores, se observa como el amortiguamiento de ambas estructuras se incrementan a medida que el coeficiente c_d aumenta. En este caso, una vez que el sistema tiene un elemento que los acopla (dispositivo de control), el sistema se convierte en uno solo, es decir, se considera una sola estructura donde las frecuencias de ambos edificios son parte del sistema global. Gracias a la ayuda del Matlab®, se pudieron diferenciar estas frecuencias y separarlas para determinar cómo los edificios son afectados independientemente, a medida que se modifica el coeficiente de amortiguamiento c_d .

Si se considera que los dispositivos de amortiguamiento cambian de posición (Fig. 4.3 y 4.5), y teniendo en cuenta que el porcentaje amortiguamiento crítico del sistema se incrementa a medida que c_d aumenta, se puede determinar cuál es la mejor posición del dispositivo de control y el valor óptimo de c_d , para obtener un control adecuado del sistema.

Si las respuestas están representadas de acuerdo a las siguientes configuraciones (Fig. 4.5)

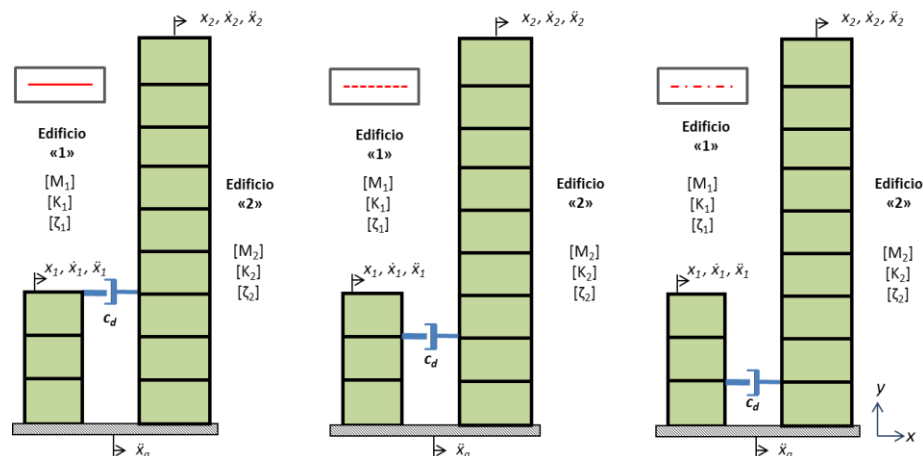


Fig. 4.5 – Modelos de estudio variando la posición del coeficiente de amortiguamiento c_d (Tipos de líneas)

Las respuestas R.M.S. de los modelos anteriores (Fig. 4.5) son obtenidas:

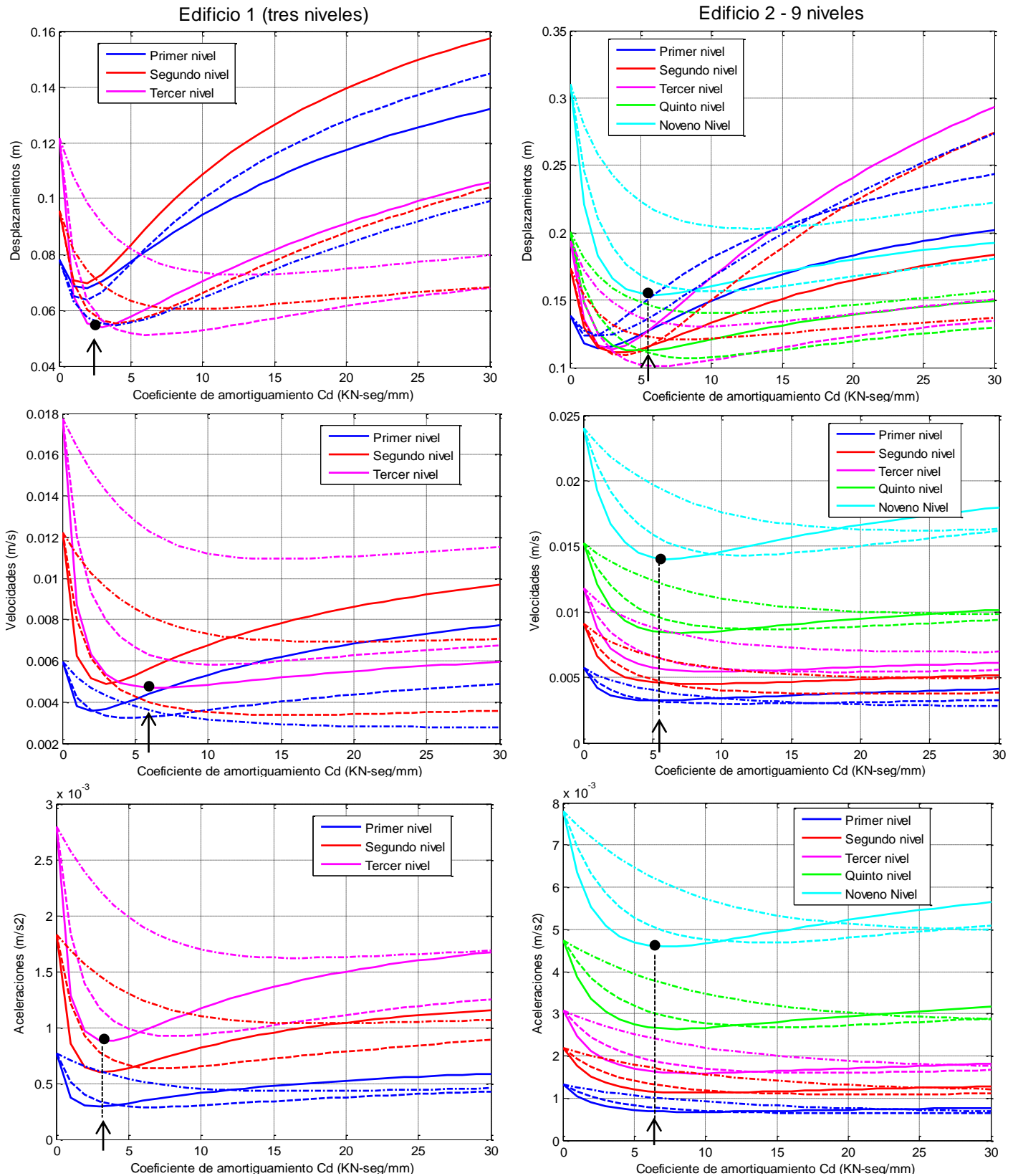


Fig. 4.6 – Respuestas R.M.S. para diferentes ubicaciones del dispositivo de control

En la figura 4.6, se observa la capacidad de control de los diferentes modelos utilizados (Fig. 4.5), y como las respuestas son reducidas a medida que el coeficiente de amortiguamiento c_d se incrementa.

En la gráfica de desplazamientos del edificio 1 (Fig. 4.6), cuando el amortiguador está en el tercer nivel (línea continua), se logra reducir el desplazamiento en el último nivel con un valor de c_d menor. Mientras, cuando se considera el dispositivo de control en el segundo nivel (línea discontinua), la respuesta se reduce pero con un valor mayor de c_d . Cuando el amortiguador se encuentra en el primer nivel (línea intercalada), la capacidad de control disminuye.

En el caso de las gráficas de velocidades y aceleraciones, se aprecia más claramente el fenómeno anterior, se requiere un c_d óptimo menor cuando el amortiguador se localiza en el tercer nivel y un c_d más grande cuando el amortiguador está en el segundo nivel

Con ello, se resume que la mejor alternativa es cuando el amortiguador se ubica en el tercer nivel. Y los valores óptimos del coeficiente de amortiguamiento podrían estar entre los siguientes valores:

c_d óptimo para el edificio 1 (tres niveles)	$c_d = 3.0$ KN-seg/mm
c_d óptimo para el edificio 2 (nueve niveles)	$c_d = 6.0$ KN-seg/mm
Valor medio óptimo de c_d para ambos edificios	$c_d = 4.5$ KN-seg/mm

Si se considera que un dispositivo de control comercial tiene un intervalo de c_d entre 1.0 – 50 KN-seg/mm; los valores óptimos pueden ser alcanzados sin ninguna dificultad.

Para éstos puede obtener los periodos principales y el amortiguamiento del sistema:

TABLA 4.1 - PERIODOS PRINCIPALES PARA DIFERENTES VALORES DE c_d

	$c_d = 0$ KN-seg/mm			$c_d = 3.0$ KN-seg/mm			$c_d = 4.5$ KN-seg/mm			$c_d = 6.0$ KN-seg/mm		
	T_1 (seg)	T_2 (seg)	T_3 (seg)	T_1 (seg)	T_2 (seg)	T_3 (seg)	T_1 (seg)	T_2 (seg)	T_3 (seg)	T_1 (seg)	T_2 (seg)	T_3 (seg)
Edificio 1	1.010	0.327	0.172	0.968	0.323	0.172	0.943	0.323	0.172	0.912	0.323	0.172
Edificio 2	2.257	0.847	0.448	2.220	0.875	0.494	2.190	0.872	0.499	2.160	0.873	0.505

TABLA 4.2 - PORCENTAJES DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO PARA DIFERENTES VALORES DE c_d

	$c_d = 0$ KN-seg/mm			$c_d = 3.0$ KN-seg/mm			$c_d = 4.5$ KN-seg/mm			$c_d = 6.0$ KN-seg/mm		
	ξ_1 (%)	ξ_2 (%)	ξ_3 (%)	ξ_1 (%)	ξ_2 (%)	ξ_3 (%)	ξ_1 (%)	ξ_2 (%)	ξ_3 (%)	ξ_1 (%)	ξ_2 (%)	ξ_3 (%)
Edificio 1	2.00	2.00	3.14	39.90	4.03	3.34	64.66	4.03	3.39	93.44	4.03	3.42
Edificio 2	2.00	2.00	2.84	5.41	3.06	5.40	6.24	2.73	6.14	6.40	2.55	6.34

Una de las características del dispositivo utilizado en los modelos es que el dispositivo funciona como un elemento semiactivo, variando su coeficiente de amortiguamiento c_d , de acuerdo a las fuerzas de control requeridas. Sin embargo, en caso de un corte en el suministro de energía, el dispositivo tiene la propiedad de funcionar como un amortiguador pasivo con comportamiento lineal (Kurino et al. 2004), el cuál considera un coeficiente de amortiguamiento $c_d=50$ KN-seg/mm, lo que da un amplio margen de aprovechamiento de acuerdo a los valores obtenidos en el análisis anterior.

Una vez determinado el coeficiente de amortiguamiento óptimo, se obtienen las formas modales para $c_d=0$, $c_d=4.5$ y $c_d=12$ KN-seg/mm. El primer valor representa un caso particular, cuando los edificios se encuentran desacoplados ($c_d=0$), mientras que el valor intermedio representa el

coeficiente medio óptimo para ambos modelos ($c_d = 4.5 \text{ KN-seg/mm}$), con el cual se obtienen las respuestas mínimas en ambos modelos. Finalmente, el valor más grande ($c_d = 12 \text{ KN-seg/mm}$) considera que los edificios están acoplados con una conexión rígida.

En la figura 4.7 se muestran las primeras tres formas modales, cuando el amortiguador se encuentra en el primer nivel.

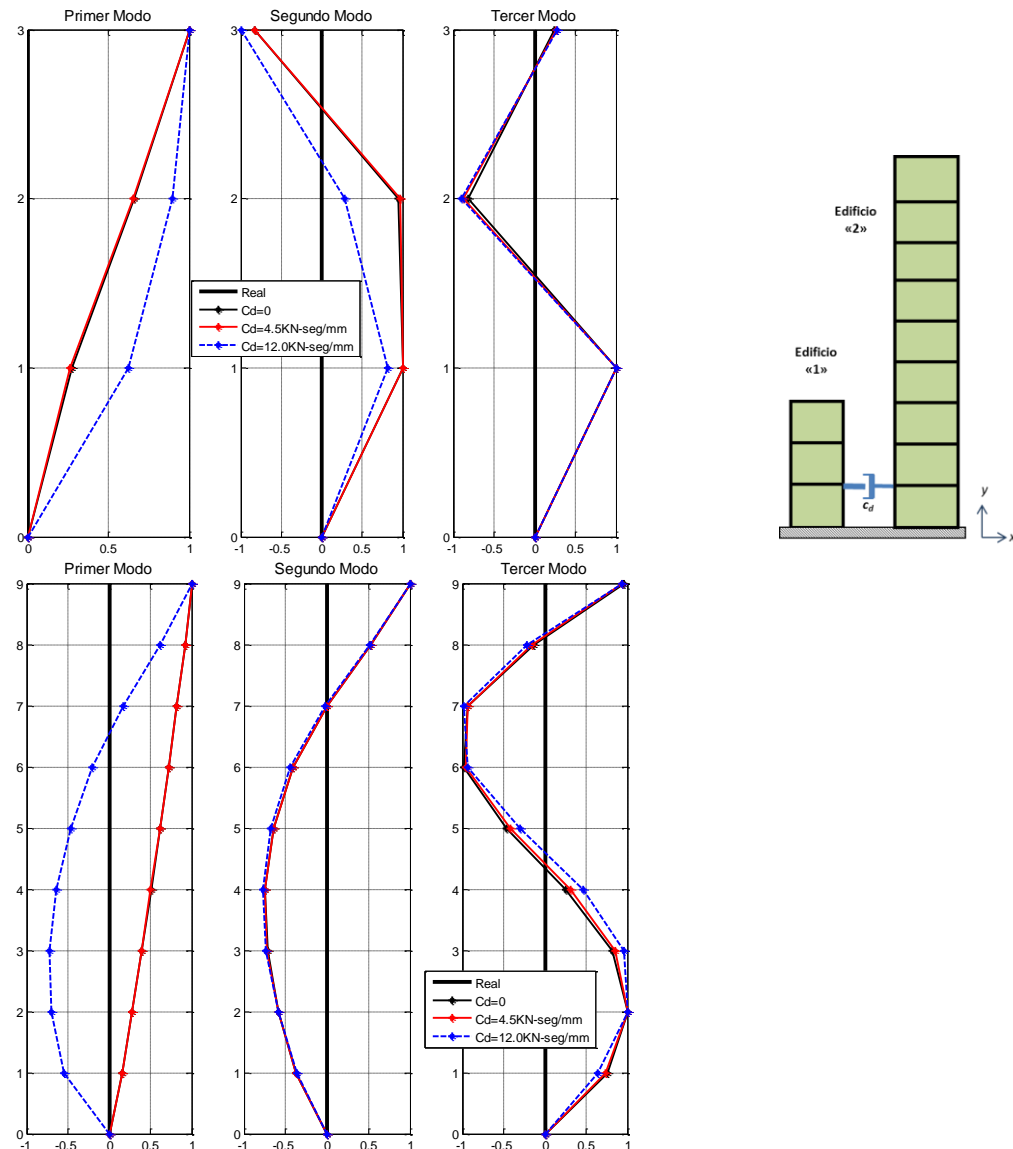


Fig. 4.7 – Formas modales edificio de tres y nueve niveles (amortiguador ubicado en el primer nivel)

En la gráfica anterior, se observa como las formas modales de ambos edificios son modificadas para diferentes valores de c_d . Se aprecia que el primer nivel del Edificio 1 (tres niveles) es “arrastrado” por el Edificio 2 (nueve niveles) en su primera forma modal y también tiene la misma influencia en el modo dos. En el tercer modo el efecto es imperceptible.

En las formas modales del edificio 2 de la figura 4.7, la influencia del amortiguador en el primer nivel afecta principalmente la primera forma modal. Como se observa en la figura 4.7, el edificio 1

crea cierta resistencia sobre la deformación del edificio 2, debido a que este tiene que “arrastrar” un cuerpo más que es la estructura pequeña (tres niveles). Las formas modales 2 y 3 no tienen ninguna alteración a medida que la conexión se hace más rígida.

En la figura 4.8 se presentan las primeras tres formas modales, cuando el amortiguador se encuentra en el segundo nivel.

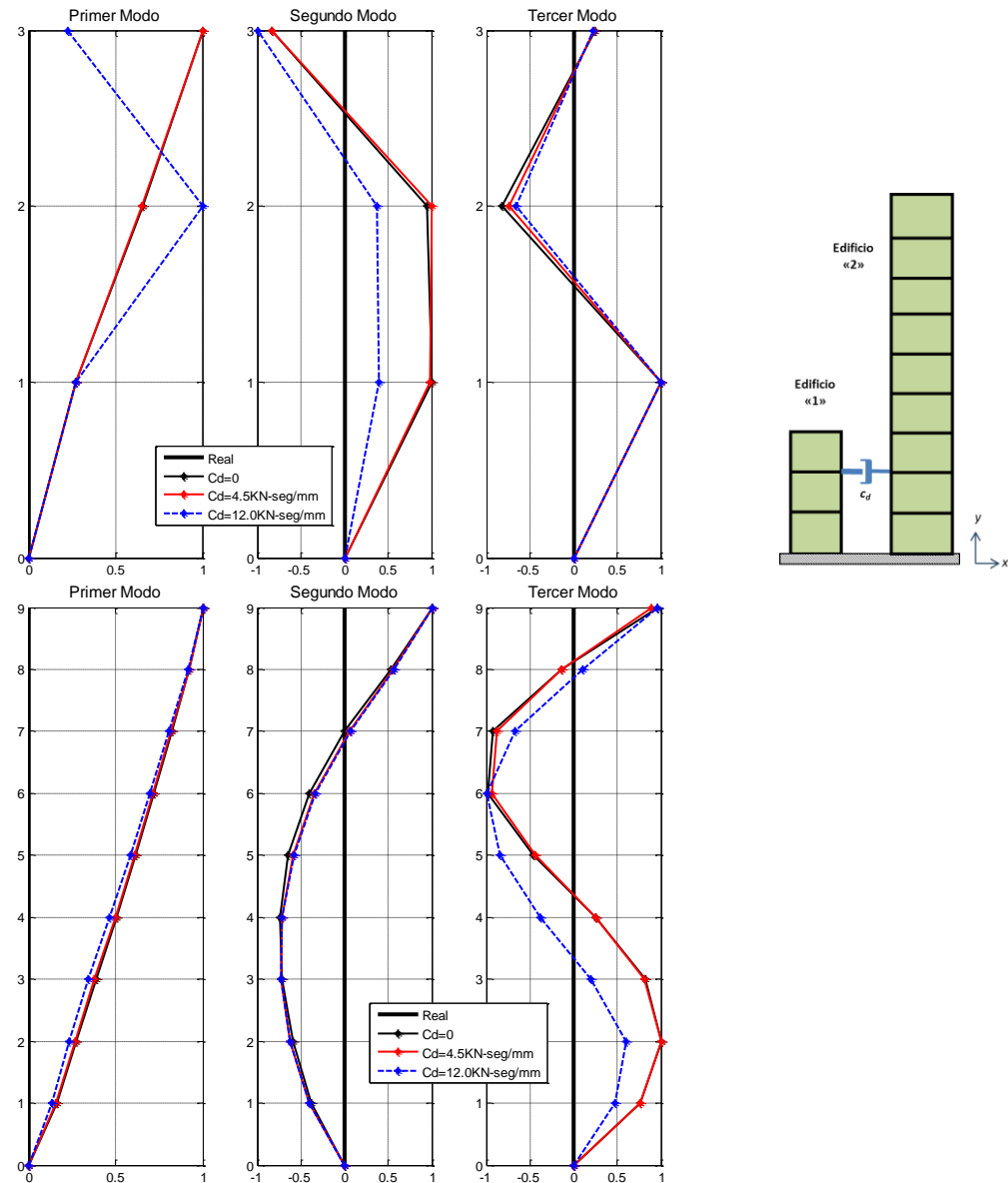


Fig. 4.8 – Formas modales edificio de tres y nueve niveles (amortiguador ubicado en el segundo nivel)

De la gráfica anterior se concluye que el amortiguador ubicado en el segundo nivel de ambos modelos, afecta principalmente el primer y segundo modo del edificio 1, de igual manera, el edificio 2 “arrastra” el segundo nivel del edificio pequeño. En la primera y segunda forma modal, el desplazamiento máximo ya no se observa en el último y primer nivel respectivamente. El efecto de acoplamiento cambia el desplazamiento máximo al segundo nivel en el modo 1, y al tercer nivel en el modo dos. El efecto de c_d en la tercera forma modal es mínimo.

Las formas modales en el edificio 2 no son afectadas de manera significativa; sin embargo, el modo 3 tiene una variación en su configuración, esto debido a que el edificio grande tiene de alguna manera “empujar” o “arrastrar” la estructura pequeña.

En la figura 4.9 se determinan las primeras tres primeras formas modales, cuando el amortiguador se encuentra en el tercer nivel.

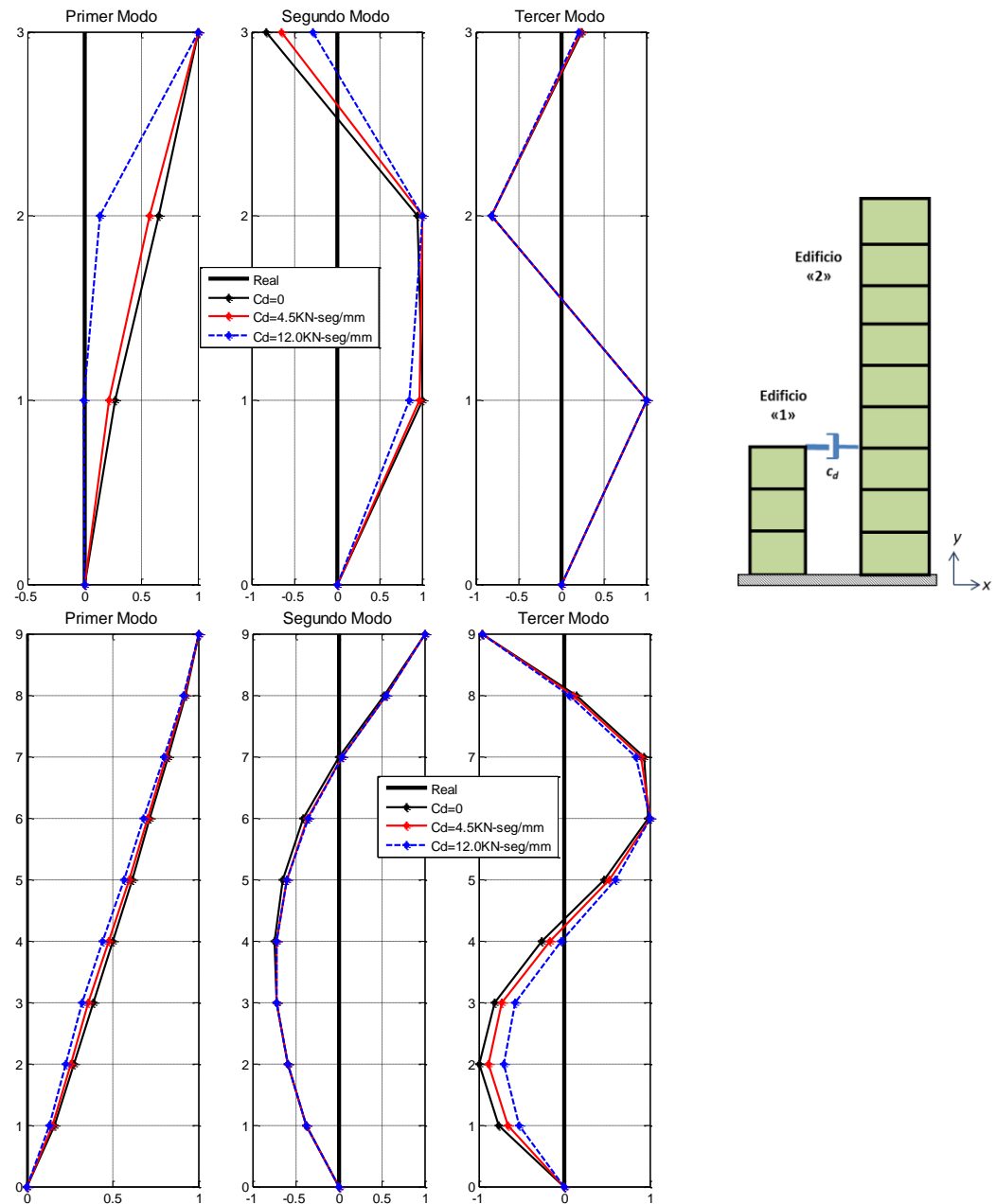


Fig. 4.9 – Formas modales edificio de tres y nueve niveles (amortiguador ubicado en el tercer nivel)

En la figura anterior se observa que el modo 1 tiene un cambio de forma, esto debido a que el edificio 2 “arrastra” a la estructura pequeña de su tercer nivel. Cuando $c_d = 0$, la distribución de distorsiones es lineal, mientras que cuando las estructuras se encuentran acopladas, la distorsión en el nivel 3 es mayor que en niveles inferiores. En el segundo modo se aprecia que a medida que c_d crece,

el desplazamiento horizontal en el nivel 3 se reduce considerablemente; se podría suponer que cuando $c_d \rightarrow \infty$, el desplazamiento en ese punto tendería a cero. Por último, el efecto del dispositivo de control sobre la tercera forma modal es casi nulo, debido a que no existe variación en su trayectoria.

Por otro lado, el efecto del amortiguador sobre las formas modales del edificio 2 (nueve niveles) no tiene mucha relevancia. Se observa que los modos 1 y 2 no son afectados particularmente, mientras que en la tercera forma modal, a medida que c_d se incrementa, se aprecia una pequeña variación en su distribución.

4.4 NÚMERO DE DISPOSITIVOS DE CONTROL ADECUADOS

Así como se definió una ubicación adecuada para el dispositivo de control, también es posible considerar el uso de varios amortiguadores. En el presente punto se implantan varios dispositivos en los diferentes niveles, y se analizan los resultados para determinar cuál es la mejor alternativa para utilizar en estructuras acopladas.

Los siguientes modelos fueron considerados para determinar la mejor opción: tres amortiguadores en los tres primeros niveles, dos dispositivos en los niveles dos y tres, y por último un amortiguador ubicado en el tercer nivel (Fig. 4.10).

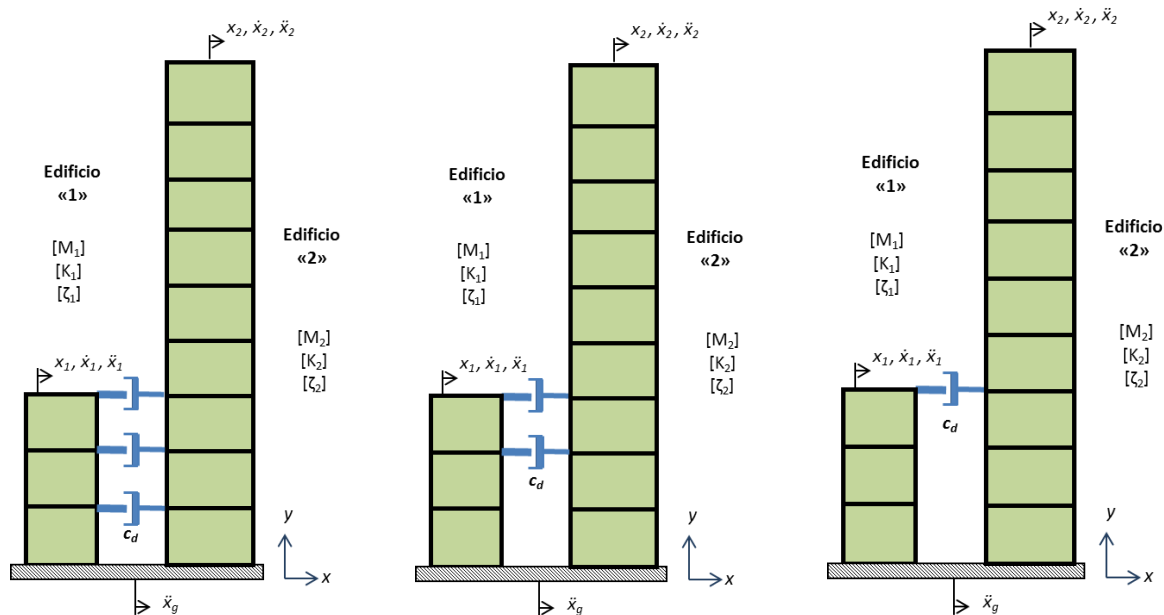


Fig. 4.10 – Modelos utilizados para determinar el número de dispositivos de control adecuados

De igual manera que para casos anteriores, se modifican las propiedades del dispositivo de control (c_d), y se determina cómo el amortiguamiento crítico de las estructuras se modifica.

En las figuras 4.11 a 4.13 se presenta cómo el porcentaje de amortiguamiento crítico de cada estructura se incrementa a medida que el valor de c_d crece, para las diferentes cantidades de dispositivos de control.

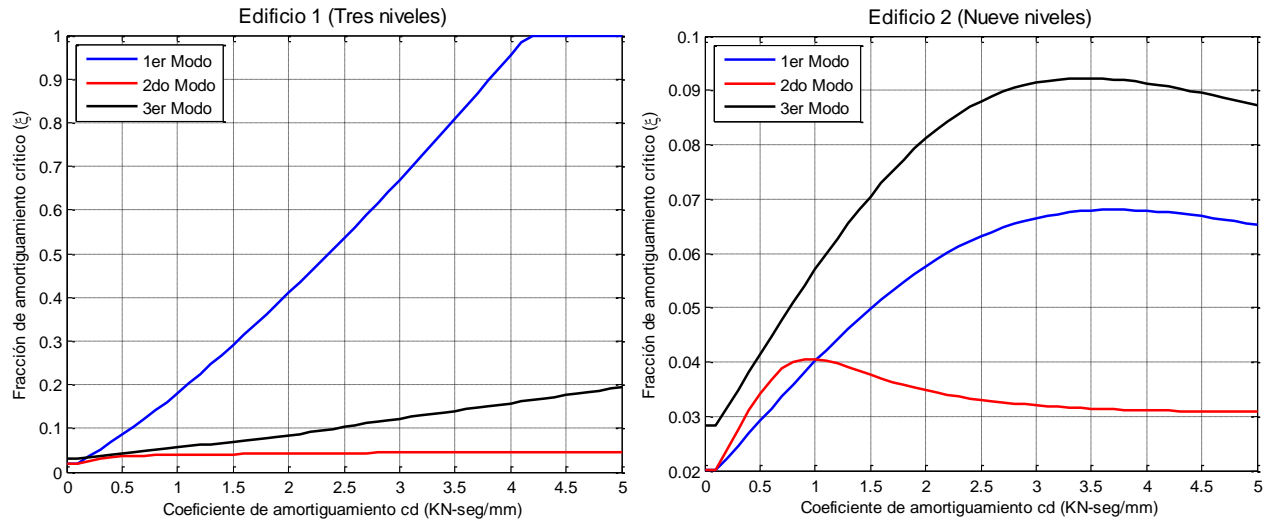


Fig. 4.11 – % Amortiguamiento crítico Vs. c_d para 3 amortiguadores (tres primeros niveles)

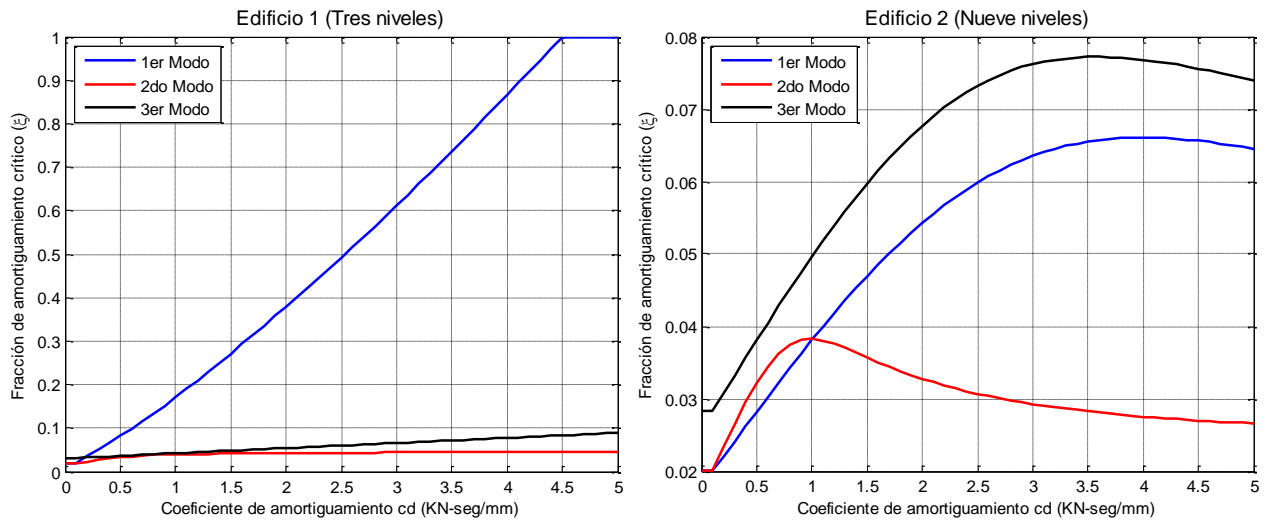


Fig. 4.12 – % Amortiguamiento crítico Vs. c_d para 2 amortiguadores (segundo y tercer nivel)

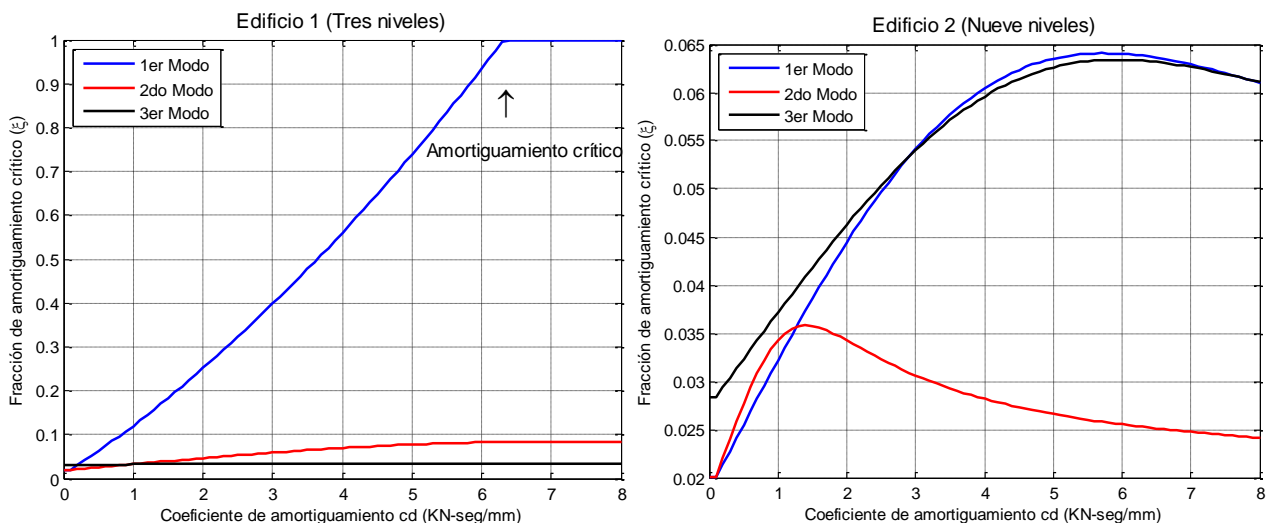


Fig. 4.13 – % Amortiguamiento crítico Vs. c_d para 1 amortiguador (tercer nivel)

En las gráficas anteriores se observa que el porcentaje de amortiguamiento en el edificio 1 (tres niveles) alcanza valores críticos en su primer modo a medida que c_d se incrementa. El incremento en el segundo y tercer modo no es sustancial; sin embargo, cabe señalar cuando las estructuras están acopladas con tres dispositivos, con un valor menor de c_d ($c_d=4.2 \text{ KN-seg/mm}$ – Fig. 4.11) se alcanza un porcentaje de amortiguamiento de 100%; mientras cuando sólo existe un dispositivo en el tercer nivel, el porcentaje de amortiguamiento crítico alcanza un valor máximo de 100% para valores mayores de c_d ($c_d=6.2 \text{ KN-seg/mm}$ – Fig. 4.13).

Si se analiza el edificio 2 (nueve niveles), se observa que el porcentaje de amortiguamiento crítico se incrementa a medida que el valor de c_d aumenta hasta cierto punto. Los modos uno y dos tienen un incremento importante hasta un valor pico, mientras que el amortiguamiento del modo tres es afectado pero en menor escala. Si se observan los valores picos alcanzados (Fig. 4.11, 4.12 y 4.13) cuando el sistema cuenta con tres amortiguadores, el valor máximo de porcentaje de amortiguamiento crítico bordea el 10%. Por el contrario, cuando el sistema sólo cuenta con un dispositivo de control el máximo valor alcanzado es aproximadamente 6.5%.

De acuerdo con los resultados anteriores, se concluye que el amortiguamiento crítico del sistema se incrementa a medida que el valor del coeficiente de amortiguamiento c_d crece en el edificio pequeño (tres niveles) y llega a tener un valor óptimo en la estructura grande (nueve niveles). Además, la cantidad de dispositivos de acoplamiento entre los edificios ayuda a incrementar los valores de amortiguamiento suplementario en ambas estructuras.

Considerando que a medida que c_d se incrementa, el porcentaje de amortiguamiento crítico del sistema aumenta; se puede determinar cuál es la cantidad adecuada de dispositivos de control y el valor óptimo de c_d , para obtener un control adecuado de las respuestas ante cargas dinámicas. Para ello se consideran las siguientes configuraciones (Fig. 4.14):

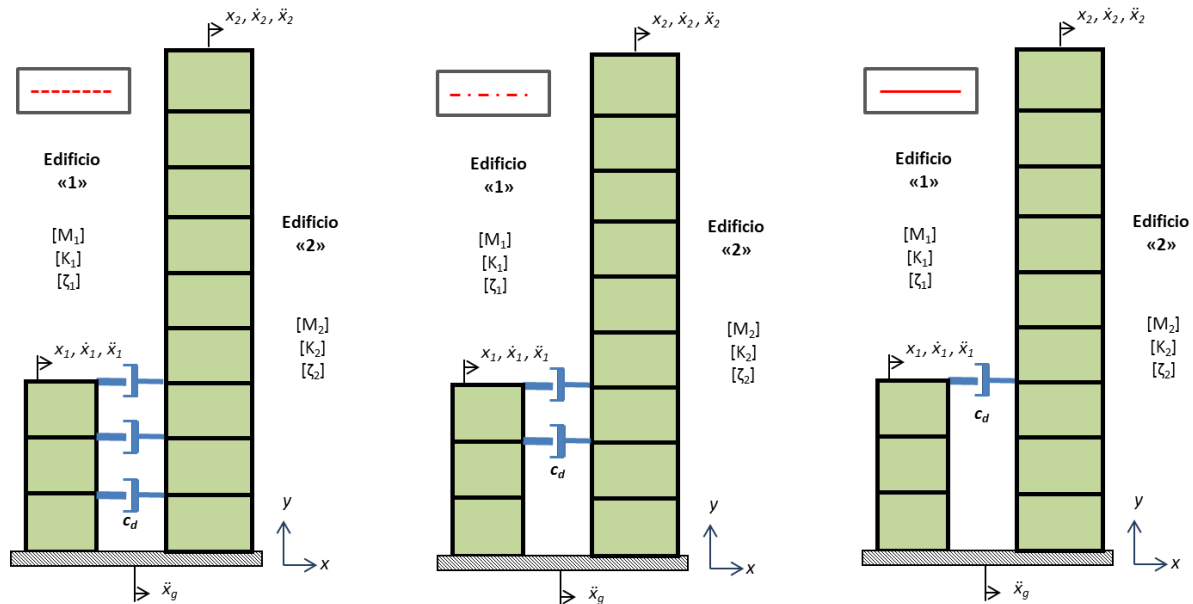


Fig. 4.14 – Modelos de estudio con diferentes cantidades de amortiguadores

Con ellos se obtienen las respuestas R.M.S. de los modelos anteriores (Fig. 4.15):

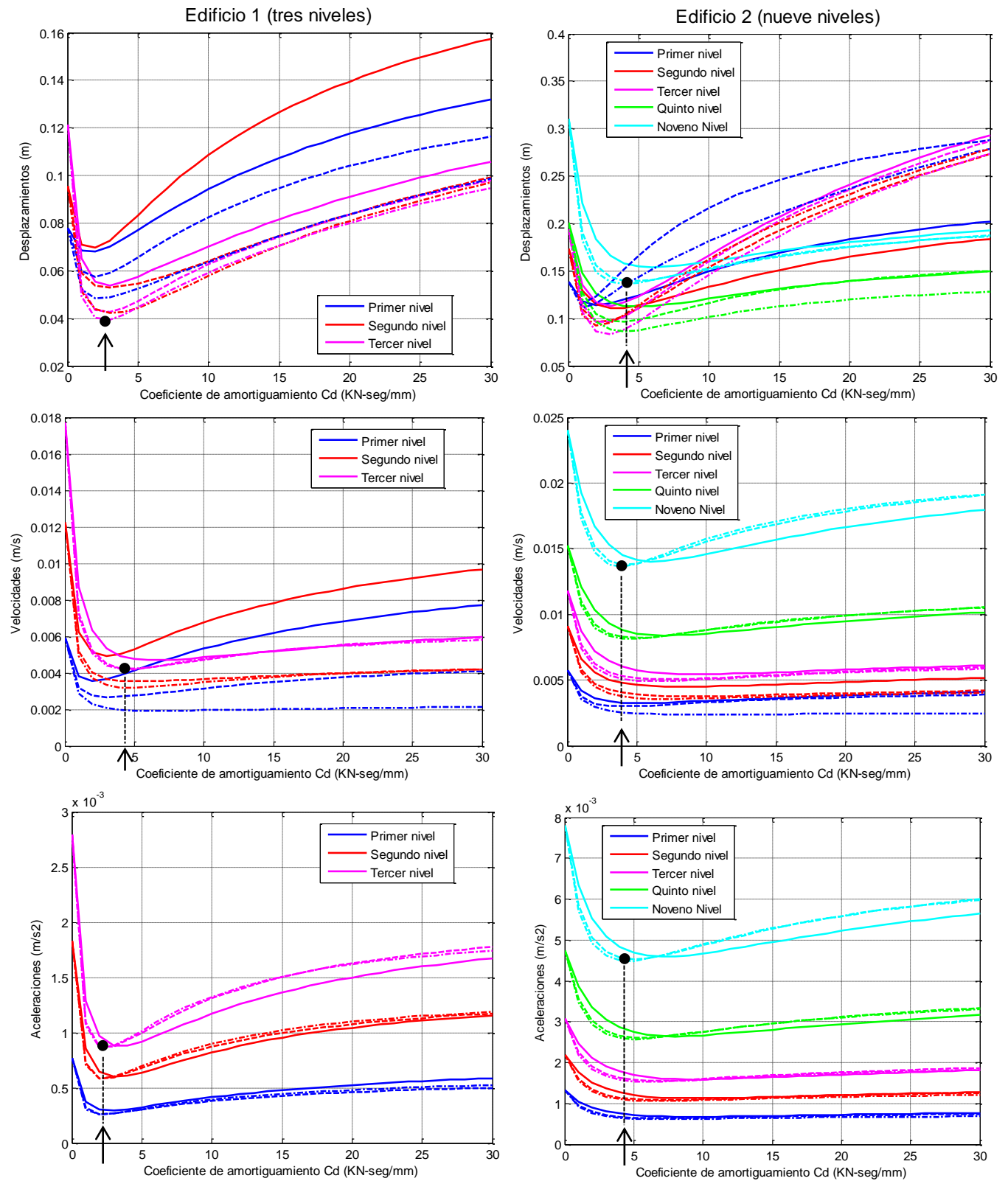


Fig. 4.15 – Respuestas R.M.S. para diferentes cantidades del dispositivo de control

En la figura 4.15, se observa la capacidad de control de los modelos utilizados (Fig. 4.14), y como las respuestas en desplazamiento, velocidades y aceleraciones de cada nivel se reducen a medida que el coeficiente de amortiguamiento c_d se incrementa.

Si se analiza el edificio 1 (tres niveles), se observa que a medida que el valor de c_d se incrementa, la reducción de la respuesta en desplazamientos es importante, especialmente en el último nivel. De manera similar que en el análisis anterior, existe un punto óptimo en cuál las respuestas son mínimas para cierto valor de c_d , después de este punto, el incremento de c_d sólo afecta de manera negativa las respuestas, es decir, ya no las reduce. Esto ocurre para las respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones (Fig. 4.15).

Si se examina el comportamiento de varios dispositivos, se puede decir que la mejor alternativa es utilizar tres amortiguadores, uno en cada nivel de acoplamiento. Se aprecia en la figura 4.15 que la capacidad de control, cuando existen tres amortiguadores, es mayor que cuando existe sólo uno; además, el valor de c_d (óptimo) para alcanzar las respuestas mínimas es menor cuando se utilizan tres dispositivos.

Si se observan las gráficas del edificio 2 (Fig. 4.15), se aprecia que las respuestas son reducidas hasta cierto punto óptimo a medida que el valor de c_d aumenta. Se observa que al igual que en el edificio pequeño, cuando se utilizan tres dispositivos de control, la reducción de las respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones es mayor, haciendo de esta la mejor alternativa. Cuando se considera un solo amortiguador (3er nivel), la reducción de las respuestas es menor; además, el valor óptimo de c_d que se obtiene es mayor ($c_d=6 \text{ KN-seg/mm}$) que cuando se utilizan tres amortiguadores ($c_d=4.5 \text{ KN-seg/mm}$).

Se pueden realizar conclusiones desde dos puntos de vista:

1. *Reducción de las respuestas.* - Sin duda, el uso de mayor cantidad de dispositivos de control resulta la mejor alternativa. En este caso particular, con el uso de tres amortiguadores se consiguen reducir efectivamente las respuestas, que cuando se utiliza uno o dos elementos.
2. *Respuestas versus costo.* - Se consigue una mejor respuesta con un número mayor de amortiguadores; sin embargo, si se pondera el elevado costo de los dispositivos de control, la reducción de la respuesta utilizando tres dispositivos o solamente uno, no se justifica económicamente. Por ejemplo, si se analizan las respuestas en desplazamientos del edificio 1 (Fig. 4.15) utilizando tres y dos amortiguadores, éstas se reduce aproximadamente de 12cm a 4.2 y 4.5cm respectivamente, mientras que utilizando un dispositivo de control en el tercer nivel, la respuesta se reduce de 12cm a 5.3cm. Por lo tanto, una reducción en desplazamientos de 1.1cm representa un gasto doble, considerando un solo dispositivo o dos.

Al igual que en los estudios de ubicación, se estudia cómo la cantidad de dispositivos de control afectan las diferentes formas modales de cada estructura.

En la figura 4.16 se muestran las formas modales de ambas estructuras cuando existen 3 amortiguadores, y considerando diferentes valores del coeficiente c_d como: $c_d=0$; $c_d=3.6 \text{ KN-seg/mm}$ (óptimo) y $c_d=10 \text{ KN-seg/mm}$.

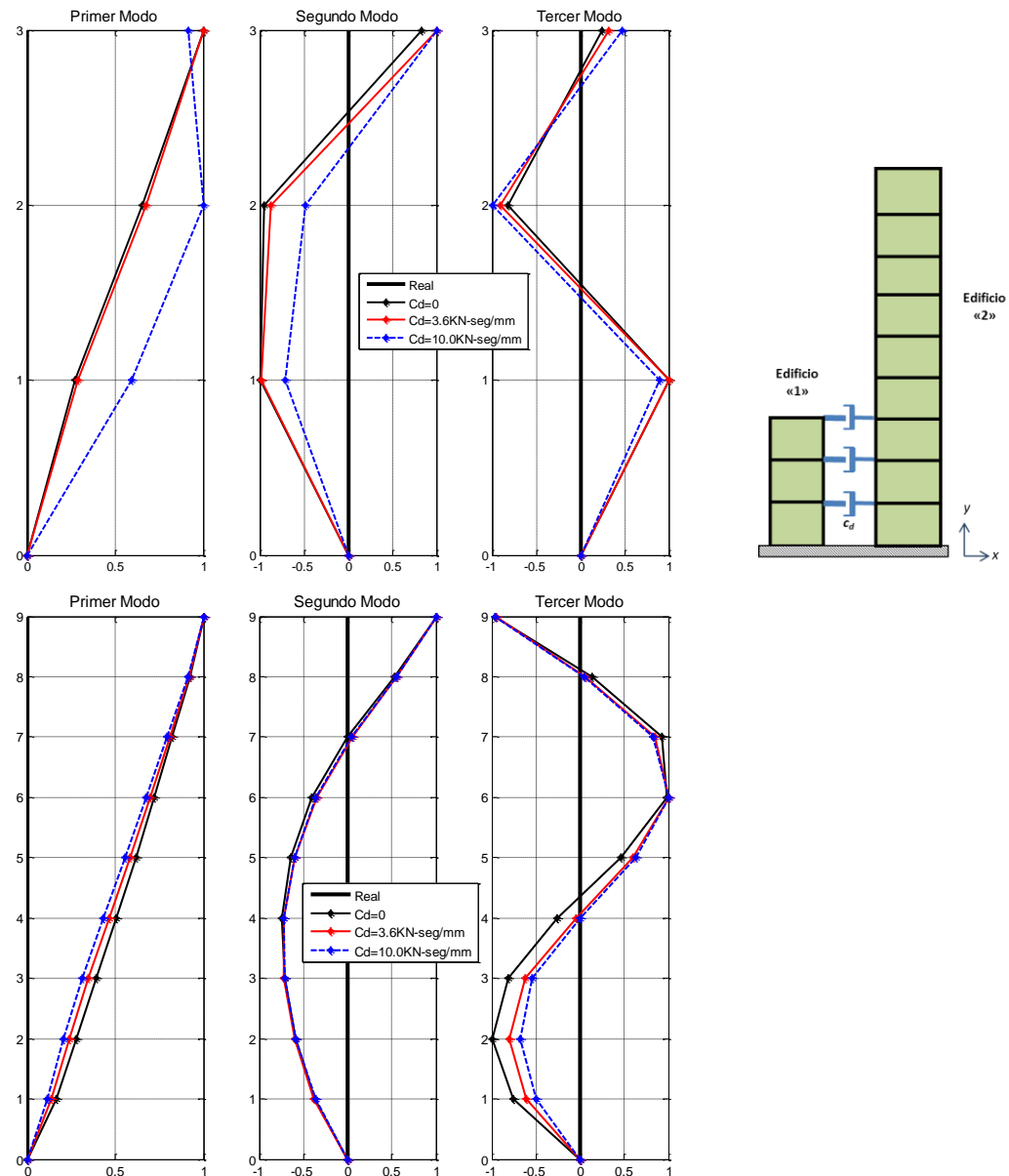


Fig. 4.16 – Formas modales considerando tres amortiguadores (edificios de tres y nueve niveles)

Al analizar el edificio 1, se observa que el coeficiente c_d afecta principalmente las primeras dos formas modales. El efecto sobre la primera forma modal se podría explicar como si el edificio 2 “arrastrara” al edificio 1 a medida que c_d se hace más rígido; mientras que el modo dos es afectado de manera contraria, los desplazamientos se reducen. El modo tres es afectado, pero en menor proporción.

Si se analiza el edificio 2, se aprecia que las primeras dos formas modales tienen una leve variación en su configuración, mientras en el modo 3 el efecto del amortiguador es más notorio.

De igual manera, se presentan las formas modales de ambos modelos, considerando dos amortiguadores ubicados en los niveles 2 y 3 (Fig. 4.17).

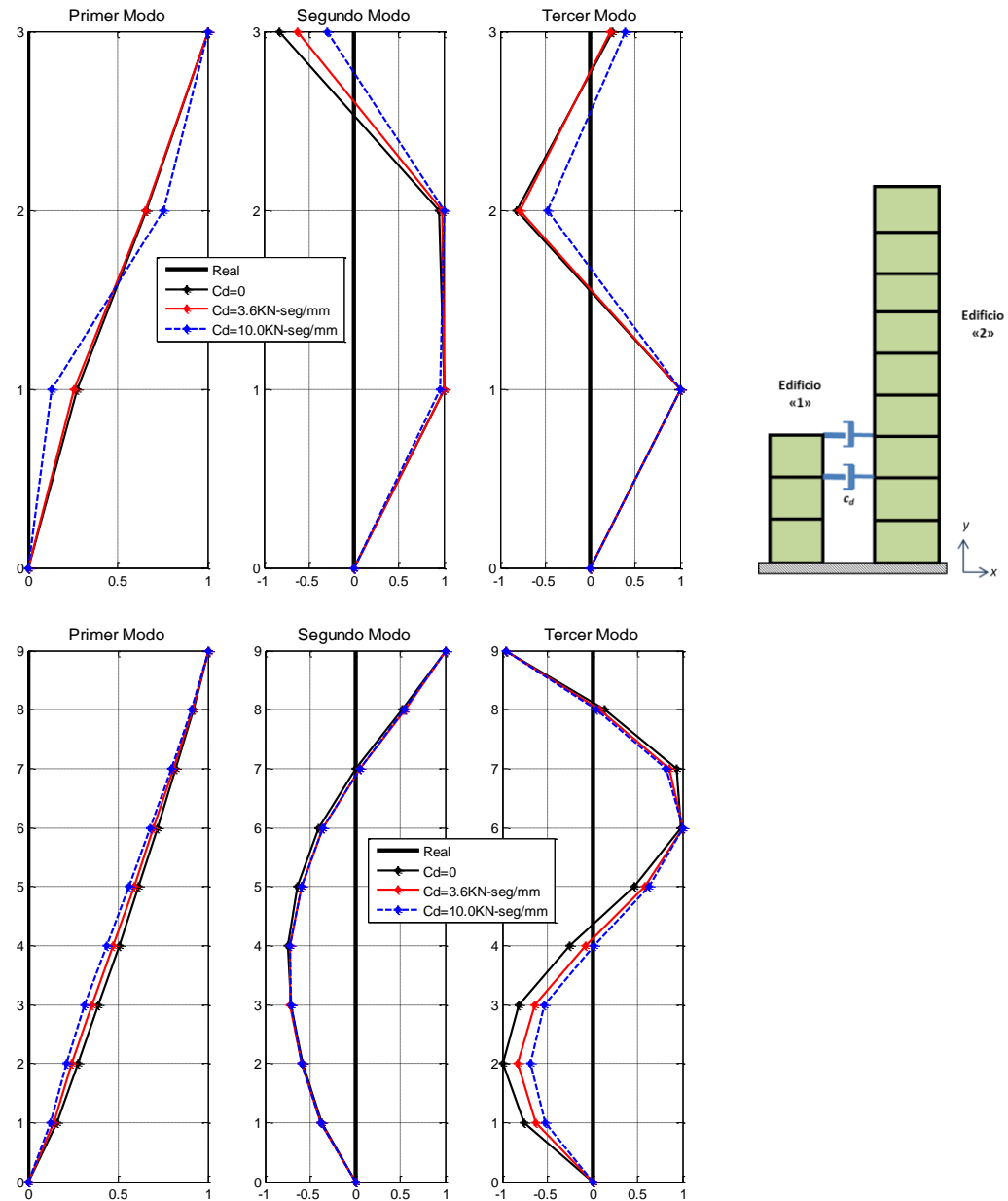


Fig. 4.17 – Formas modales considerando dos amortiguadores (edificios de tres y nueve niveles)

Al analizar ambas estructuras, se observa que los dispositivos de control tienen un efecto importante en la primera forma nodal del edificio 1. El efecto de “arrastre” en los niveles dos y tres (situados los amortiguadores) se hace evidente para valores de c_d grandes. La segunda forma modal se afecta sólo en el nivel tres, y el modo tres en su segundo y tercer nivel.

Los efectos sobre el edificio 2 no son relevantes, especialmente en las dos primeras formas modales. Se aprecia una cierta oposición al movimiento sobre el modo 1 provocado por el edificio uno. La variación de configuración en la forma modal tres es más notoria en los niveles inferiores.

4.5 FORMAS MODALES COMPLEJAS

En puntos anteriores se determinaron las formas modales de los diferentes modelos de estudio, y cómo éstas varían a medida que las propiedades dinámicas de los sistemas son modificados. Sin embargo, para entender el significado de éstas desde el punto de vista de la dinámica estructural, se realiza un análisis más profundo.

En un sistema sin amortiguamiento, la ecuación de movimiento está representada por:

$$M\ddot{u} + Ku = p(t) \quad (4.3)$$

y sus formas modales por el vector:

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} \quad [K - \omega^2 M] \{\Phi\} = 0 \quad (4.4)$$

donde M y K son las matrices de masa y rigidez del sistema respectivamente, $p(t)$ la excitación externa y Φ los valores característicos que definen las formas modales del sistema.

Si se considera un sistema con amortiguamiento, su ecuación está definida por:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t) \quad (4.5)$$

Si se representa la ecuación 4.5 en el espacio de estados, se tiene:

$$A\dot{z}(t) + Bz(t) = F(t) \quad \text{donde:} \quad A = \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad B = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Donde las matrices A y B son simétricas y de orden $2n \times 2n$ (n representa el número de GDL del sistema) y su solución está dada por:

$$z(t) = \Psi e^{\lambda t} \quad (4.7)$$

De igual manera que para el sistema sin amortiguamiento, se obtiene la ecuación generalizada característica, remplazando la ec. 4.7 en la ec. 4.6.

$$[\lambda A + B] \{\Psi\} = 0 \quad (4.8)$$

La solución de la ecuación 4.8 da como resultado un número $2n$ de eigenvalores que corresponden a los $2n$ eigenvectores (Ec. 4.9) que deben satisfacer la ecuación característica:

$$\det[\lambda A + B] = 0 \quad (4.9)$$

donde el valor de λ y los eigenvectores Ψ están representados de la siguiente manera:

$$\lambda_r = -\zeta_r \omega_r + i \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} = -\zeta_r \omega_r + i \omega_{dr} \quad (4.10)$$

$$\Psi = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{2n} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

Debido a que los valores de las matrices son reales, los eigenvalores pueden ser reales, como también pueden tener sus pares conjugados complejos. Los eigenvalores reales indican un alto amortiguamiento debido a los modos sobre-amortiguados, la mayoría de las estructuras tienen n pares conjugados de eigenvalores complejos (Craig y Kurdila 2006), en el anexo 1 se amplía esta explicación.

Los eigenvectores correspondientes a un eigenvalor complejo de λ_r es también complejo, y también el eigenvector correspondiente a un eigenvalor conjugado complejo de λ_r , por consiguiente estos son denominados los *modos complejos* de la estructura.

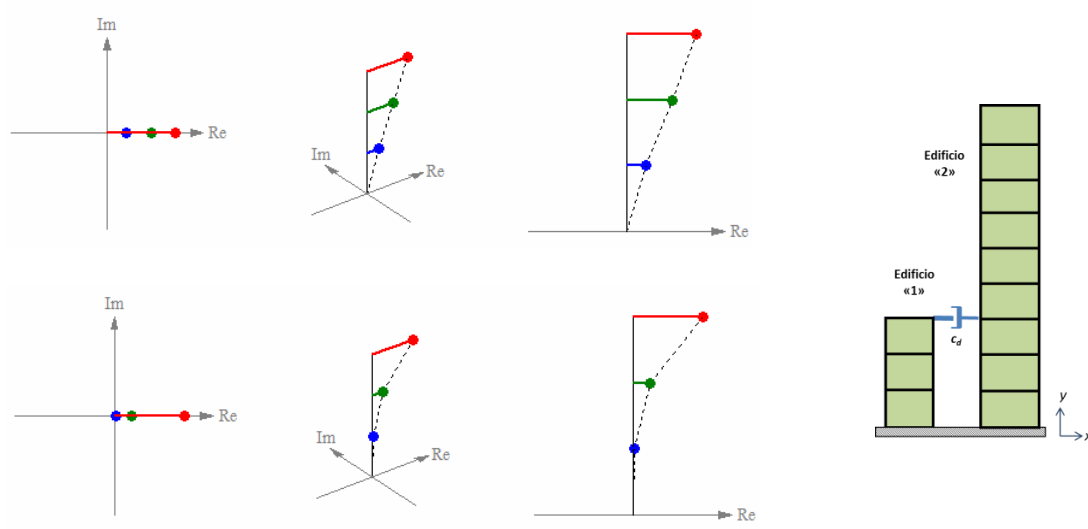
Cabe señalar que ω_r es la frecuencia natural del sistema (no la frecuencia no amortiguada). Para un sistema que considera amortiguamiento viscoso, ω_r se puede considerar como la frecuencia no amortiguada sólo si el sistema considera un amortiguamiento proporcional a la masa o rigidez (Rayleigh).

En la presente investigación se hace énfasis en este punto, debido a que los modelos de estudio consideran un amortiguamiento proporcional; sin embargo debido al acoplamiento del sistema, se introduce un amortiguamiento suplementario adicional que modifica las propiedades dinámicas del sistema. Esto representa una rotación de las formas modales de las estructuras y en un incremento de la parte imaginaria de los eigenvectores.

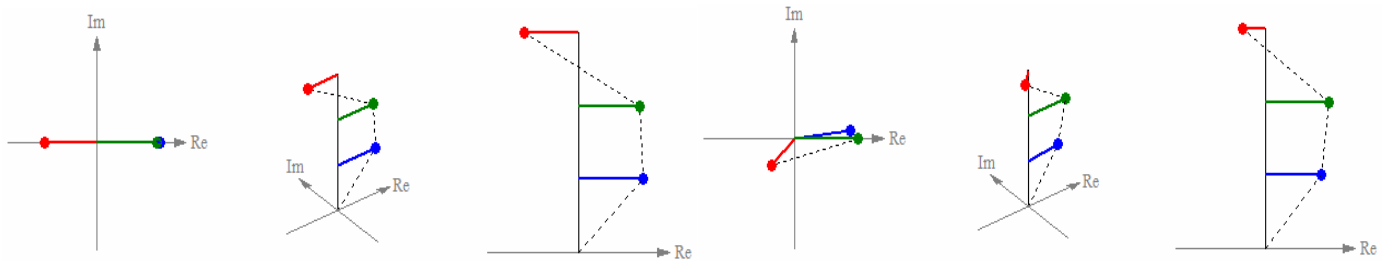
En las figuras que representan las formas modales de la estructura (Figs. 4.7 a 4.9, 4.16 y 4.17), se muestra sólo la parte real de los eigenvectores del sistema; sin embargo, a medida que el amortiguamiento del sistema se incrementa debido a los dispositivos de control, la parte compleja de los eigenvectores también se incrementan.

Por ejemplo, si se considera los modelos de estudio (tres y nueve niveles), se puede asegurar que cuando el valor de c_d es cero, las estructuras no están acopladas y su comportamiento es independiente. Si cada modelo considera amortiguamiento proporcional, entonces sólo existirá la parte real de los eigenvectores, por tanto las formas modales (Figs. 4.7 a 4.9, 4.16 y 4.17) tendrán su máximo valor en el eje *Real* de coordenadas.

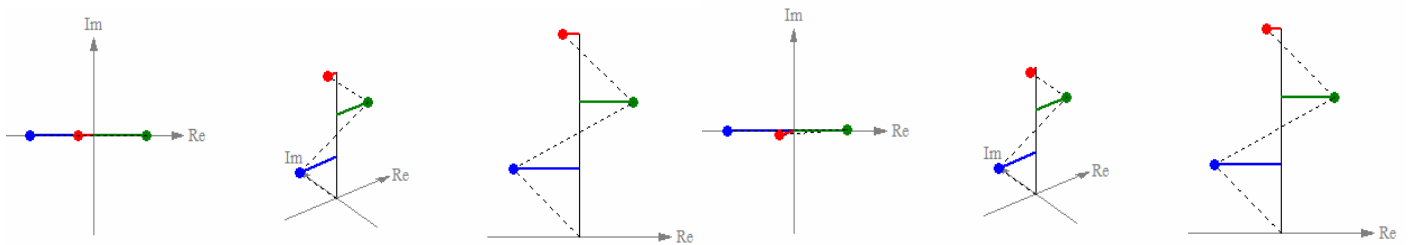
Por otro lado, a medida que c_d se incrementa, la parte imaginaria de los eigenvectores también crece en valor. Así, las formas modales tendrán una rotación en los ejes *Real* e *Imaginario* y las respuestas máximas no coinciden en el eje real. En las siguientes figuras se ilustra este fenómeno para valores de $c_d=0$ y $c_d=10 \text{ KN-seg/mm}$.



a) Primera forma modal Real y Compleja



b) Segunda forma modal Real y Compleja

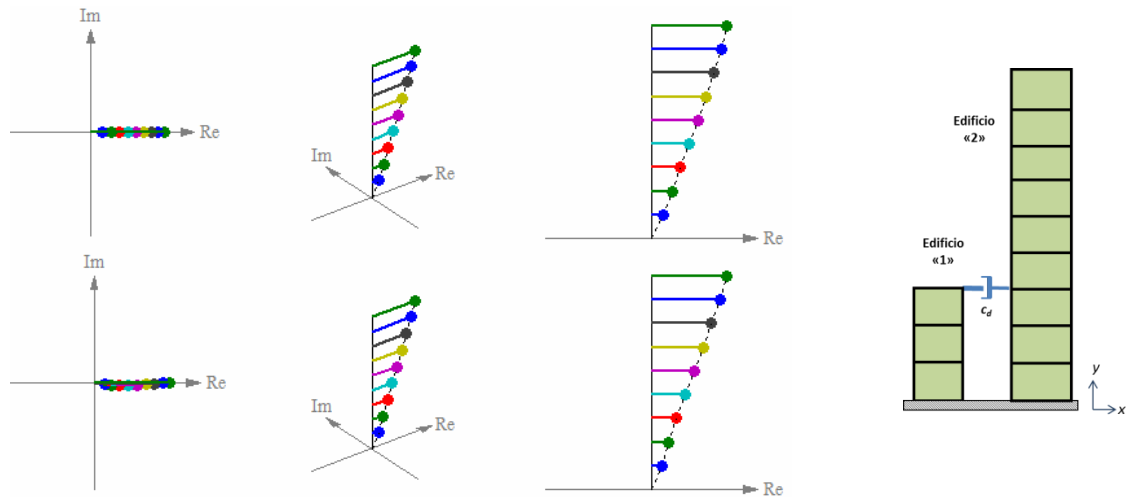


c) Tercera forma modal Real y Compleja

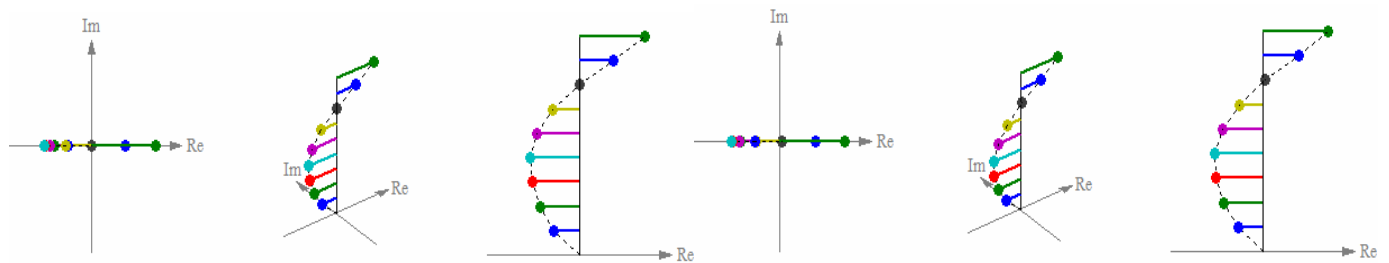
Fig. 4.18 – Formas modales complejas considerando 1 amortiguador en el tercer nivel (Edificio 1)

En la figura 4.18 se observa cómo las formas modales se modifican para diferentes valores de c_d (0 y 12 KN-seg/mm) y la rotación de las respuestas en las coordenadas *Real* e *Imaginaria*. En los modos 1 y 3 los eigenvectores complejos no tienen un incremento importante en su valor, por ello la rotación en el eje *Imaginario* no es muy visible. Por el contrario, el segundo modo tiene un incremento relevante en sus valores imaginarios, y aprecia claramente (Fig. 4.18b) que las respuestas máximas no coinciden en un mismo punto, sino que se transfieren al eje de coordenadas complejas.

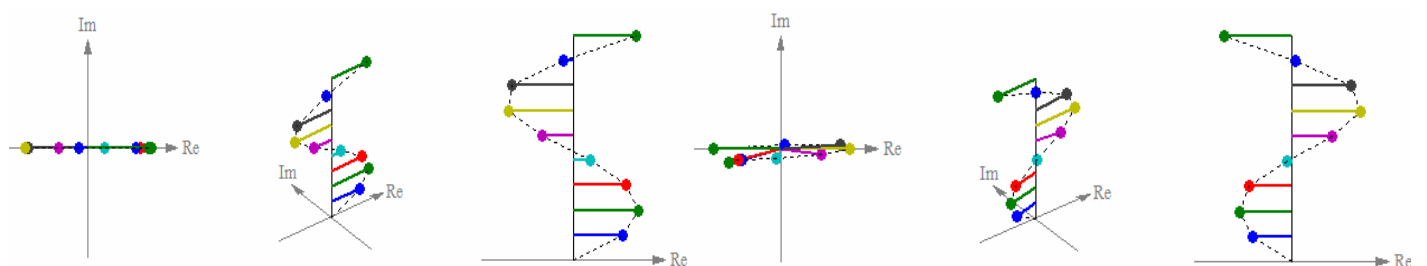
Para el edificio 2 (nueve niveles) también se realizó el mismo análisis (Fig. 4.19).



a) Primera forma modal Real y Compleja



b) Segunda forma modal Real y Compleja

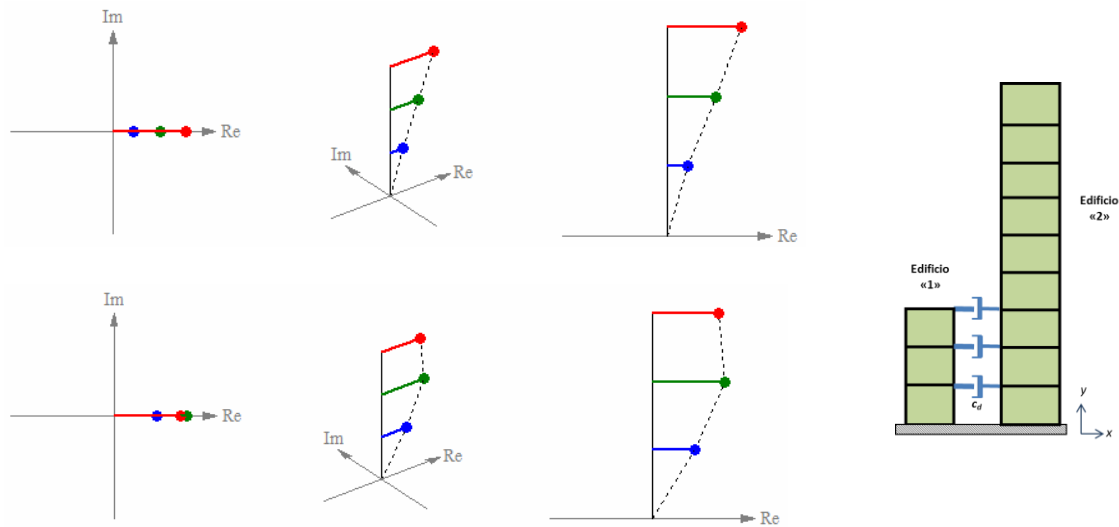


c) Tercera forma modal Real y Compleja

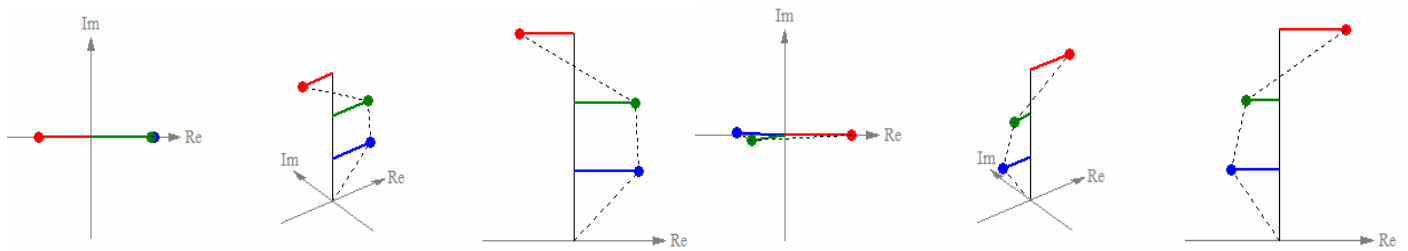
Fig. 4.19 – Formas modales complejas considerando 1 amortiguador en el tercer nivel (Edificio 2)

En este caso a diferencia del edificio 1, se aprecia que las formas modales complejas en el modo 2 son imperceptibles; la forma modal uno tiene una ligera rotación de sus respuestas sobre el eje *Imaginario*. De igual manera que en el análisis de modos real (Fig. 4.9), se observa que a medida que el valor de c_d aumenta, el modo 3 es afectado, rotando las respuestas de su eje *Real* al *Imaginario*. Este fenómeno demuestra que el incremento de amortiguamiento en el sistema del edificio 2 afecta directamente las formas modales complejas del modo 3.

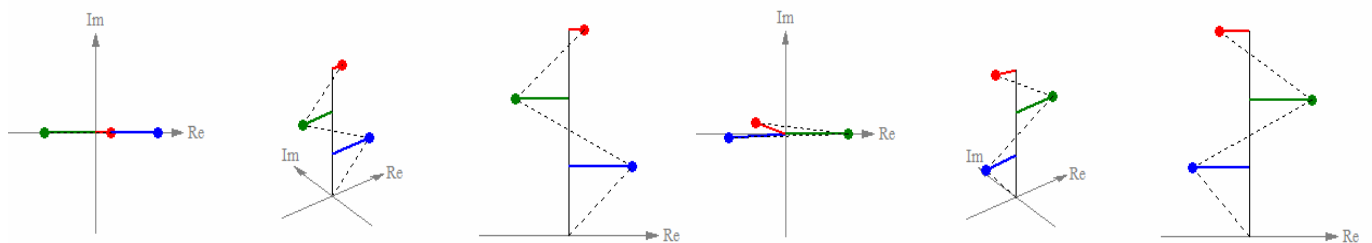
Ahora, se considera el modelo que utiliza 3 amortiguadores en sus primeros niveles; que representa la mejor alternativa para la reducción de las respuestas (Fig. 4.20), se consideran dos valores de $c_d, 0$ y 10 KN-seg/mm .



a) Primera forma modal Real y Compleja



b) Segunda forma modal Real y Compleja



c) Tercera forma modal Real y Compleja

Fig. 4.20 – Formas modales complejas considerando 3 amortiguadores en cada nivel (Edificio 1)

Como se aprecia en la figura anterior, el coeficiente de amortiguamiento c_d tiene un efecto importante en las formas modales dos y tres; el incremento de los eigenvectores complejos es evidente y la rotación de las respuestas máximas. En el primer modo, a pesar de que existe una variación en la configuración, la parte compleja de las respuestas es mínima y casi imperceptible.

En la figura 4.21 se estudia la influencia de los amortiguadores en el edificio 2 (nueve niveles) y cómo afecta sus formas modales complejas.

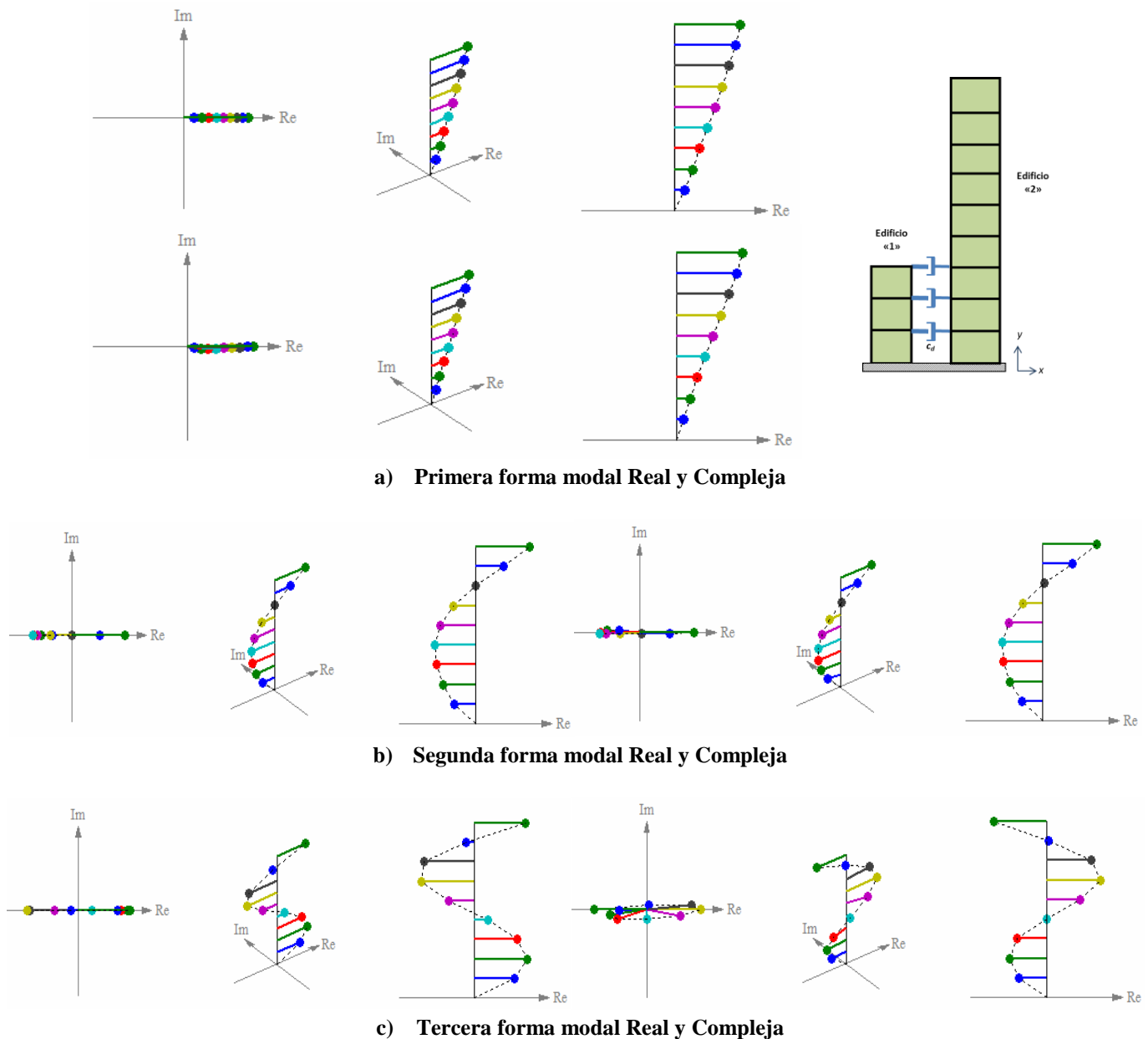


Fig. 4.21 – Formas modales complejas considerando 3 amortiguadores en cada nivel (Edificio 2)

De la figura anterior se concluye que: la primera forma modal (Fig. 4.21a) tiene una pequeña rotación de sus respuestas máximas hacia el eje Imaginario, a causa del incremento de c_d . En el modo 2, el incremento de amortiguamiento en el sistema tiene un pequeño efecto sobre los eigenvectores complejos, se observa una leve rotación de las respuestas (Fig. 4.21b); mientras que para la forma modal 3, el efecto del incremento en el amortiguamiento es importante, a diferencia de los dos primeros modos, la rotación de los ejes en el modo 3 es evidente, resultando que las respuestas máximas no coincidan sobre un eje coordenado.

4.6 COMENTARIOS FINALES

En el presente capítulo se realizó un estudio detallado sobre edificios acoplados y los dispositivos de control utilizados como elemento de acoplamiento. Se analizaron varias alternativas como la ubicación y cantidad de elementos. Se concluye que:

- Se obtuvo una reducción importante en las respuestas considerando tres dispositivos en los tres primeros niveles de cada estructura.
- Desde el punto de vista de costos, utilizar un amortiguador ubicado en el tercer nivel, resulta también una opción viable para su aplicación, ya que se obtienen reducciones importantes de las respuestas.

También se observó la importancia de las formas modales complejas de cada edificio y el efecto de los elementos de acoplamiento sobre éstas. Para tener una idea de cómo se deformarían las estructuras una vez implantados los dispositivos de control.

Cuando un sistema tiene un amortiguamiento viscoso proporcional, se observa que las frecuencias naturales son casi iguales que un sistema sin amortiguamiento, debido a que las raíces imaginarias en la ecuación 4.10 son predominantes, lo que reduce la existencia de los modos complejos en el sistema. Para un sistema con amortiguamiento no proporcional como éste, las raíces tienen una componente cada vez más grande en el eje real. Como consecuencia, las frecuencias tienen diferente valor que el de una estructura no amortiguada o con amortiguamiento proporcional (desacoplada en este caso). Es necesario conocer estos valores, ya que un excesivo amortiguamiento en el sistema puede ocasionar un sistema sobreamortiguado, el cual tiene raíces reales negativas, muy diferentes a las de un sistema desacoplado.

Asimismo, la presencia de un amortiguamiento suplementario en el sistema producirá un desfase de las masas, es decir, las respuestas máximas de las formas modales no coinciden en un mismo tiempo (Fig. 4.18). Es necesario tener en cuenta este aspecto cuando el diseño del sistema de control se basa en las formas modales del sistema.

En capítulos posteriores se estudia la aplicación de algoritmos de control de sistemas de control activos y semiactivos, y se determinan mejoras importantes.

CAPÍTULO 5

UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO Y SEMIACTIVO EN ESTRUCTURAS ACOPLADAS

5.1 INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería civil, la tendencia en el diseño de edificios es construir estructuras más grandes, largas y flexibles; sin embargo, para ello es necesario controlar sus vibraciones ante cargas externas, y brindar un nivel de comodidad aceptable para sus usuarios y, por supuesto, un grado de seguridad elevado.

Ante los eventos extraordinarios de los últimos años, los niveles de seguridad en estructuras se han incrementado paulatinamente, haciendo que los sistemas de seguridad sean cada vez más complejos, con costos elevados para salvaguardar las funciones críticas de la estructura. De acuerdo a la importancia que puedan tener éstas (hospitales, escuelas, plataformas petroleras o plantas nucleares) y su impacto en la sociedad, su control es cada vez más riguroso.

En las últimas décadas, se han utilizado sistemas de control pasivo a puentes, edificios y otros, con el fin de reducir sus vibraciones bajo condiciones de carga extremas. Sin embargo, los sistemas pasivos no son capaces de adaptarse a las condiciones dinámicas ambientales como los sistemas de control activo.

Un sistema activo consiste en aquella estructura que está provista de sensores y actuadores que están vinculados a uno o varios controladores (generalmente computadoras), que son capaces de introducir energía externa a los elementos, de tal manera que se puedan controlar varios modos de la estructura. Generalmente estos elementos están ubicados en lugares estratégicos de la estructura, y a pesar de que son considerados como parte integral de los elementos de la misma, pueden ser modelados independientemente.

En el capítulo 2 se estudiaron los diferentes tipos de control y su aplicación en estructuras para mitigar sus respuestas ante sollicitaciones dinámicas. En el presente capítulo se estudian los sistemas de control activo y semiactivo, y los algoritmos de control a utilizarse en los modelos de edificios acoplados.

5.2 TEORÍA DE CONTROL DE SISTEMAS ACTIVOS

La idea del control activo en estructuras no sólo es una alternativa atractiva, sino también una idea revolucionaria, ya que eleva los conceptos de ingeniería estructural de la estática usual (diseño de elementos bajo cargas básicas), a comportamientos dinámicos y adaptables que aumentan la capacidad de la estructura a resistir cargas extraordinarias (Soong 1990).

Si se considera la ecuación de movimiento del sistema:

$$M\ddot{x}_{(t)} + C\dot{x}_{(t)} + Kx_{(t)} = Du_{(t)} + Ef_{(t)} \quad (5.1)$$

Donde M , C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente; $f_{(t)}$ es el vector que representa la excitación externa, $u_{(t)}$ el vector definido por la fuerza de control, y por último D y E son las matrices que definen la ubicación de las fuerzas de control y excitación externa.

Si se supone que el vector $u_{(t)}$ es una función lineal del vector de desplazamiento $x_{(t)}$, la velocidad $\dot{x}_{(t)}$ y la fuerza de excitación $f_{(t)}$, la ecuación tiene la siguiente forma:

$$u_{(t)} = K_1x_{(t)} + C_1\dot{x}_{(t)} + E_1f_{(t)} \quad (5.2)$$

donde E_1 , C_1 y K_1 son las ganancias de control que dependen del tiempo.

Si se reemplaza la ecuación 5.2 en la 5.1 se tiene:

$$M\ddot{x}_{(t)} + (C - DC_1)\dot{x}_{(t)} + (K - DK_1)x_{(t)} = (E + DE_1)f_{(t)} \quad (5.3)$$

En la ecuación 5.3 se aprecia el concepto y representación del control activo en estructuras; y como un diagrama cerrado de planta (closed-loop) afecta las respuestas del sistema. Se observa que los parámetros de rigidez y amortiguamiento se modifican por las ganancias, y su reducción y efectividad dependerá de los algoritmos de control seleccionados.

En general, la idea de utilizar un control activo puede modificar las propiedades del sistema (Ec. 5.3), de esta manera se pueden aprovechar los cambios en el sistema para responder a las excitaciones externas de la forma más favorable.

Uno de los primeros pasos para desarrollar la teoría de control activo es seleccionar una función adecuada de la ecuación 5.2, que esté en concordancia con las leyes del control activo. La bibliografía (Soong 1991 y Preumont 2006) propone varios tipos de algoritmos de control para aplicaciones en ingeniería estructural, en la presente investigación se utilizó el algoritmo LQR.

5.2.1 Algoritmos de control

En los estudios disponibles sobre sistemas de control activos se proponen varios tipos de algoritmos, basados en diferentes criterios (Soong 1991 y Gawronski 2004). Muchos de éstos son considerados clásicos y tienen sus aplicaciones en ingeniería espacial, mecánica y electromecánica. Sin embargo, las aplicaciones en el campo de la ingeniería estructural hacen que sean problemas especiales.

Para comprender los principios, primero se define la ecuación de movimiento del sistema, representada en el espacio de estados:

$$\dot{z}_{(t)} = Az_{(t)} + Bu_{(t)} + Hf_{(t)} \quad \text{donde} \quad z_{(t)} = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Los valores de $A(2nx2n)$, $B(2n \times m)$ y $H(n \times r)$ se definen como;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} I \\ -M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

y junto con D y E , están asociados a la cantidad, ubicación de los controladores y las excitaciones externas del sistema.

En la teoría clásica de control, es necesario definir el vector $u_{(t)}$, de manera tal que la respuesta en la ecuación 5.4 se minimice y a la vez se cumplan todas sus restricciones. Para ello se define el **índice de desempeño** denominado J . Este término es cuadrático en $z_{(t)}$ y $u_{(t)}$. En un tiempo $t_0=0$, se define como:

$$J = \int_0^{t_f} [z_{(t)}^T Q z_{(t)} + u_{(t)}^T R u_{(t)}] dt \quad (5.6)$$

En la ecuación 5.6, el término $z_{(t)}^T$ es la transpuesta del vector de respuestas, los valores de $Q(2nx2n)$ y $R(m \times m)$ son las matrices de peso o proporcionalidad, que definen la importancia de las fuerzas de control y valoración del sistema respectivamente.

El valor óptimo de la fuerza de control se obtiene como:

$$u_{(t)} = -R^{-1}B^T P z_{(t)} = -G z_{(t)} \quad (5.7)$$

dónde la matriz G tiene el siguiente valor,

$$G = \begin{bmatrix} [G_d] & [G_v] \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

y representan las submatrices de ganancia respecto al desplazamiento y la velocidad.

$P_{(t)}$, en la teoría de control, representa la matriz de Riccati para un determinado tiempo t_f , y su valor se podrá determinar resolviendo la ecuación del mismo nombre:

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (5.9)$$

Se observa que la ecuación de Riccati (5.9) es no lineal (Kwakernaak y Sivan 1972), lo que garantiza la existencia y unicidad de la solución para minimizar el sistema. La solución de esta ecuación se realiza en el programa MATLAB® 2009a.

Uno de algoritmos de control más usuales y que es utilizado en el presente estudio es el LQR (Linear Quadratic Regulator), que es asintóticamente estable en el diseño de estados retroalimentados (introducción de fuerzas para mejorar el desempeño del sistema). En este caso, el sistema cerrado depende de las matrices de importancia Q y R .

- a) *Valores de Q .* – Valores altos de Q ($Q \geq 0$) dan prioridad a la reducción de las respuestas sin importar el tamaño de las fuerzas de control o energía requerida. Por otro lado, valores pequeños de Q limitan la aplicación de fuerzas grandes, minimizando éstas sin importar la reducción de las respuestas.
- b) *Valores de R .* – Valores altos de R ($R > 0$) representan que el ahorro de energía es importante para la aplicación de las fuerzas de control, es decir, el algoritmo busca la mínima fuerza posible para reducir las respuestas. Por otro lado, valores pequeños de R , dan poca importancia al consumo de energía, y por tanto, pueden aplicarse mayores fuerzas de control.

Al aplicar el algoritmo LQR, se utilizan los siguientes valores de Q y R para el estudio de los modelos acoplados.

$$Q = \begin{bmatrix} [Q_v] & [0] \\ [0] & [Q_d] \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Donde las submatrices $[Q_v] = \text{diagonal}(1)$ y $[Q_d] = 0$, debido a que el control del sistema se considera con respecto a las velocidades, y la ganancia respecto a desplazamientos es nula.

$$R = \text{diag}(r) \quad (5.11)$$

Los valores de $r = 0.01 - 1.0$ definen la importancia en el consumo de energía del sistema.

Una vez definidos los parámetros que considera la teoría de control, se sustituye la ecuación 5.7 en la 5.4:

$$\dot{z}_{(t)} = (A - BG)z_{(t)} + Hf_{(t)} \quad (5.12)$$

En la ecuación 5.12, se observa que las fuerzas de control pueden modificar las propiedades dinámicas del sistema independientemente de la excitación externa. Esquemáticamente, éste concepto es la representación básica del control retroalimentado (feedback) y se muestra en la siguiente figura.

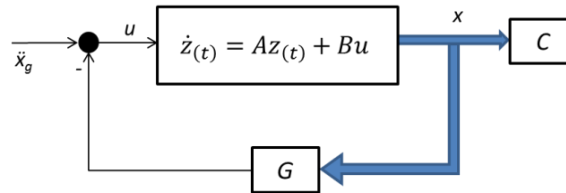


Fig. 5.1 – Diagrama de control activo retroalimentado (feedback)

5.2.2 Sistemas de control semiactivo y fuerzas de control

Un sistema de control activo, se podría considerar como un sistema óptimo. Sin embargo, a medida que el sistema requiere la introducción de grandes cantidades de energía para contrarrestar las excitaciones externas, hace ésta técnica poco viable, debido a costos y la inexistencia de dispositivos que generen tales fuerzas. Por ello, los sistemas de control semiactivos se hacen muy atractivos, por las pocas cantidades de energía externa requeridas para generar fuerzas de control relativamente elevadas.

En la actualidad, se han utilizado diferentes tipos de dispositivos semiactivos en estructuras reales, especialmente en Japón. En la presente investigación se utilizó un dispositivo semiactivo de alto desempeño, fabricado por la corporación Kajima, y que ha sido utilizado en varios edificios (Kurino et al. 2004). Las propiedades del controlador son:

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD
Fuerza máxima	2000 KN
Fuerza liberada efectiva	1700 KN
Desplazamiento máximo (pistón)	± 60 mm
Coeficiente de amortiguamiento máximo	> 600 KN-seg/mm
Coeficiente de amortiguamiento mínimo	< 6 KN-seg/mm
Velocidad máxima	280 mm/seg
Diámetro	380 mm
Peso	1000 Kg

El algoritmo de control activo (Fig. 5.1) calcula la fuerza de control necesaria para minimizar las respuestas. El controlador semiactivo es utilizado de tal manera que las fuerzas requeridas estén dentro de los intervalos admisibles del actuador. El diseño del mismo responderá a un algoritmo que será implantado por el ordenador (Fig. 5.2),

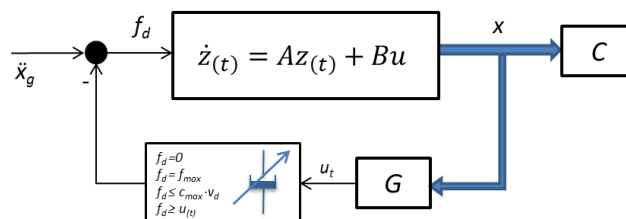


Fig. 5.2 – Diagrama de control semiactivo retroalimentado (feedback)

y responderá a las siguientes condicionantes:

$$f_d = \begin{cases} f_{\max} \times \text{signo}(v_i) & \therefore u_i \times v_i > 0 & |u_i| > f_{\max} & (a) \\ C_{\max} \times v_i & \therefore u_i \times v_i > 0 & |u_i / v_i| > c_{d\max} & |u_i| \leq f_{\max} & (b) \\ C_{i(t)} \times v_i = u_{(t)} & \therefore u_i \times v_i > 0 & |u_i / v_i| \leq c_{d\max} & |u_i| \leq f_{\max} & (c) \\ 0 & \therefore u_i \times v_i \leq 0 & & & (d) \end{cases} \quad (5.13)$$

donde $u_{(t)}$ es la fuerza de salida requerida por el sistema y calculada de acuerdo al algoritmo LQR. Si ésta fuerza $u_{(t)}$ excede el valor f_{\max} del actuador semiactivo, entonces la computadora ordenará la aplicación de esta fuerza máxima (Ec. 5.13a). Cuando el valor del cociente entre u_i y v_i (velocidad en el tiempo i) tiene un valor mayor al coeficiente de amortiguamiento $c_{d\max}$ entonces la fuerza de salida será $f_d = c_{d\max} \times v_i$ (Ec. 5.13b). Cuando el valor de u_i y el cociente u_i/v_i son menores que los máximos valores del dispositivo, la fuerza de control f_d tendrá valores intermedios y suficientes para minimizar las respuestas (Ec. 5.13c). Es necesario aclarar que cuando los modelos tengan dos ó tres dispositivos de acoplamiento (uno en cada nivel), existirán tres fuerzas de diferentes magnitudes.

Los contextos anteriores condicionan el campo de acción de los dispositivos semiactivos en sólo dos cuadrantes, es decir, se oponen al movimiento de la estructura de una forma variable, lo que hace de este sistema muy económico en términos de consumo de energía.

5.3 EXCITACIONES DEL TERRENO

En capítulos anteriores, los modelos fueron sometidos a excitaciones de ruido blanco. Sin embargo, para realizar los modelos con sistemas de control activo y semiactivo, es necesario utilizar acelerogramas de sismos reales. Esto permitirá determinar el comportamiento de las estructuras y la efectividad de cada sistema.

Para evaluar los sistemas de control propuestos, se utilizan los siguientes registros acelerográficos: a) El Centro en su componente N-S, registrado en el Imperial Valley Irrigation District, California en mayo de 1940. b) Kobe en su componente N-S, registrado por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) en enero de 1995 durante el terremoto de Hyogo-ken Nanbu. c) Taft en su componente E-W, registrado en la región de Arvin y Tehachapi, California en julio de 1952.

Estos tres registros acelerográficos tienen la particularidad de contener un intervalo de frecuencias alto, lo que conlleva a afectar a estructuras de baja y mediana altura, con periodos que oscilan de 0.2 a 0.8 seg. Los espectros de respuesta en aceleraciones fueron escalados de manera que su velocidad máxima oscile en 50 cm/seg (Kurata et al. 1999). En la figura 5.3 se presentan los espectros de respuesta en aceleraciones, cuando se considera una relación de amortiguamiento crítico de 2% del sistema:

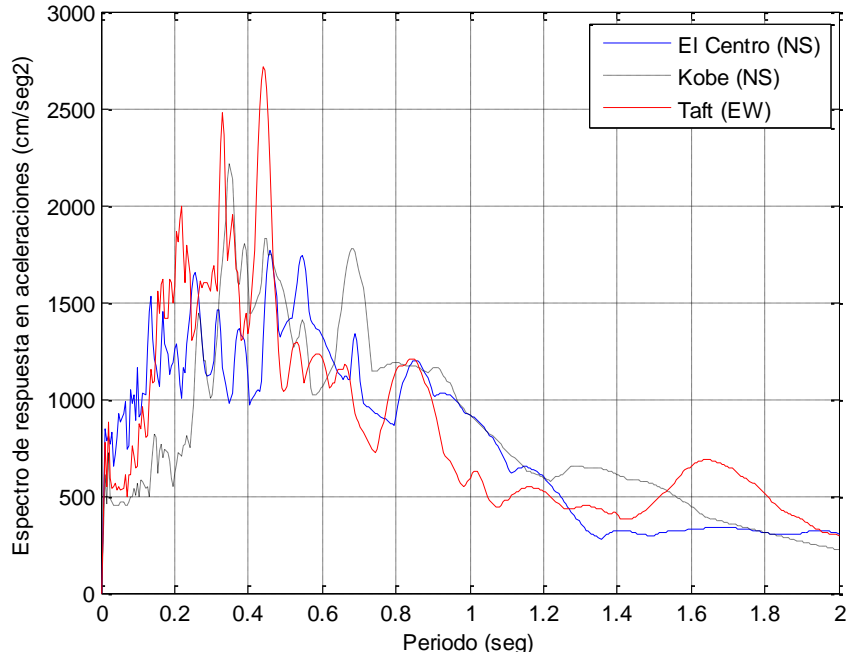


Fig. 5.3 – Espectros de respuesta en aceleración ($\zeta = 0.02$)

5.4 MODELOS DE EDIFICIOS ACOPLADOS

Los modelos acoplados son los mismos edificios estándar utilizados en capítulos anteriores. La diferencia es que, en lugar de utilizar elementos de control pasivos como dispositivos de acoplamiento, se utilizan dispositivos activos y semiactivos, que ejercen fuerzas de control sobre cada estructura.

Se analizaron dos arreglos: Cuando se tienen tres dispositivos de control en los tres primeros niveles (Fig. 5.4a) y cuando sólo exista un elemento de acoplamiento en el tercer nivel (Fig. 5.4b). Esto debido a que estudios previos demostraron que estas alternativas son las más adecuadas para la reducción de las respuestas (Capítulo 4).

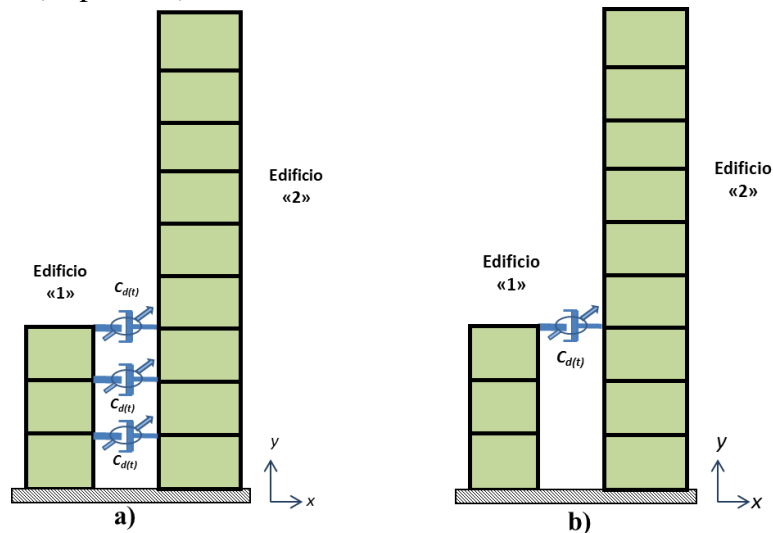
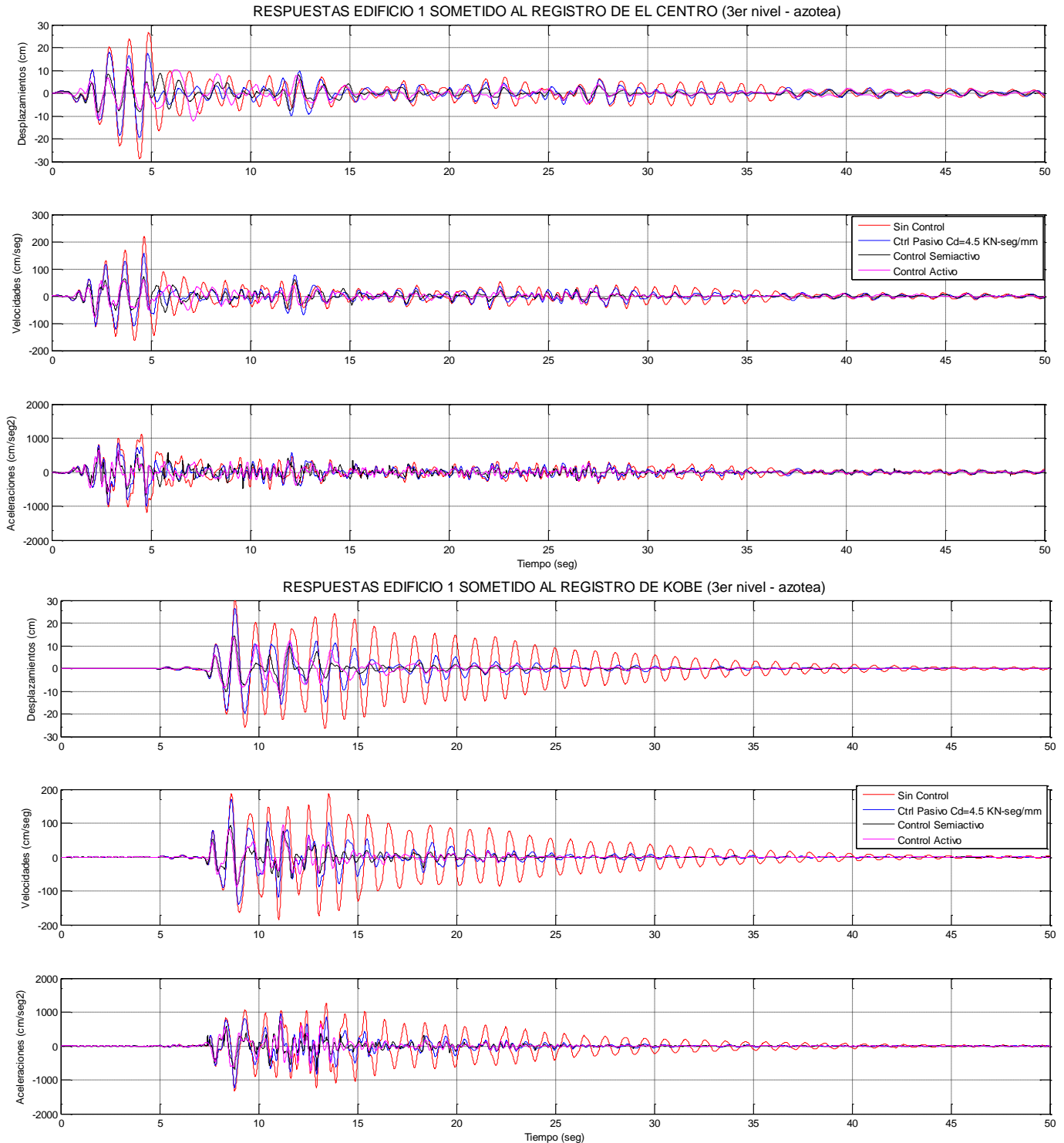


Fig. 5.4 – Modelos de edificios acoplados a) con tres dispositivos b) con un dispositivo (3er nivel)

5.5 MODELOS DE EDIFICIOS ACOPLADOS CON UN DISPOSITIVO DE CONTROL

Se realizó la simulación del modelo con un dispositivo de control como elemento de acoplamiento (Fig. 5.4b), considerando que: i) el sistema está desacoplado, ii) el dispositivo de control es pasivo (amortiguador viscoso con c_d óptimo Cap. 4), iii) el dispositivo de control es semiactivo, iv) cuando el dispositivo es activo.



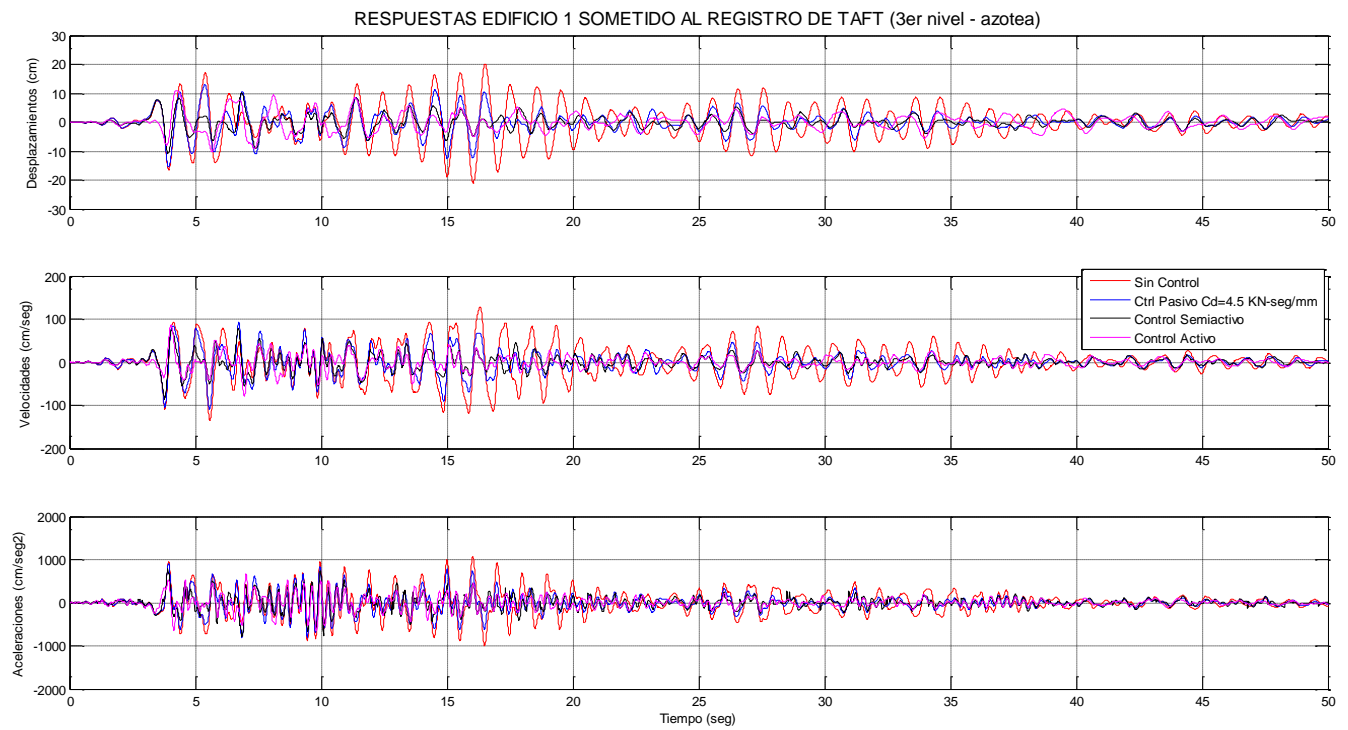


Fig. 5.5 – Respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones del Edificio 1 para diferentes registros

Las respuestas máximas por piso del Edificio 1 (tres niveles) para cada simulación:

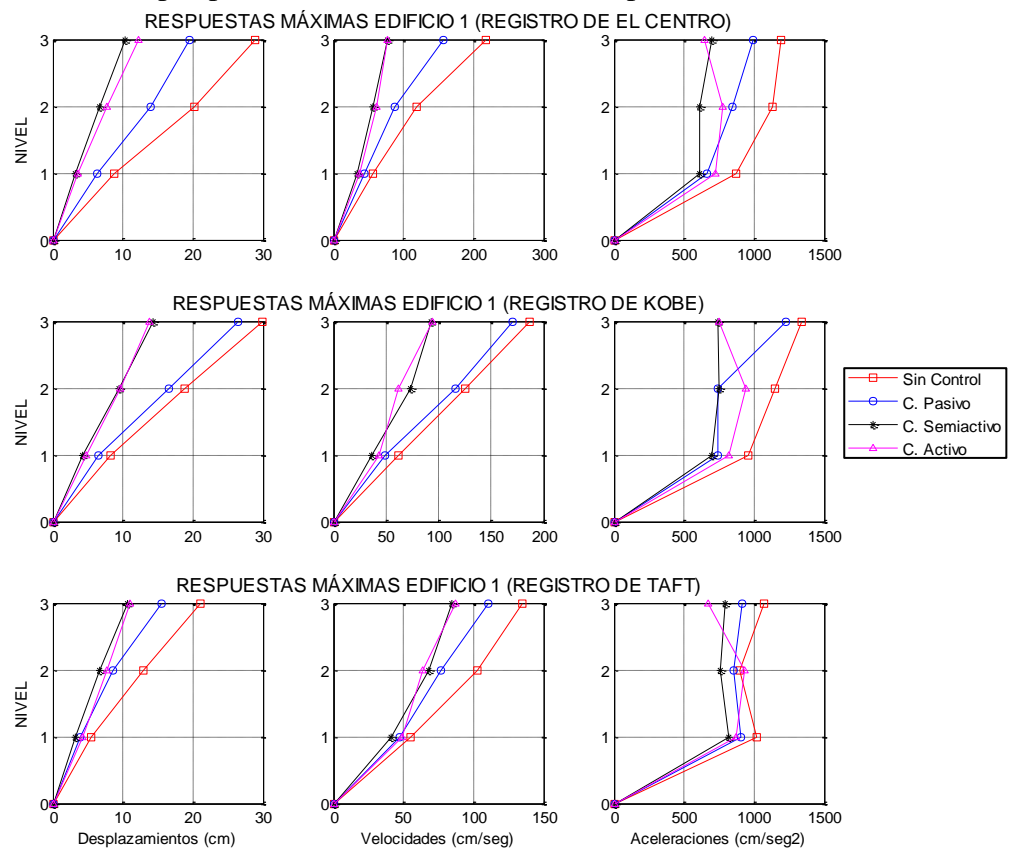
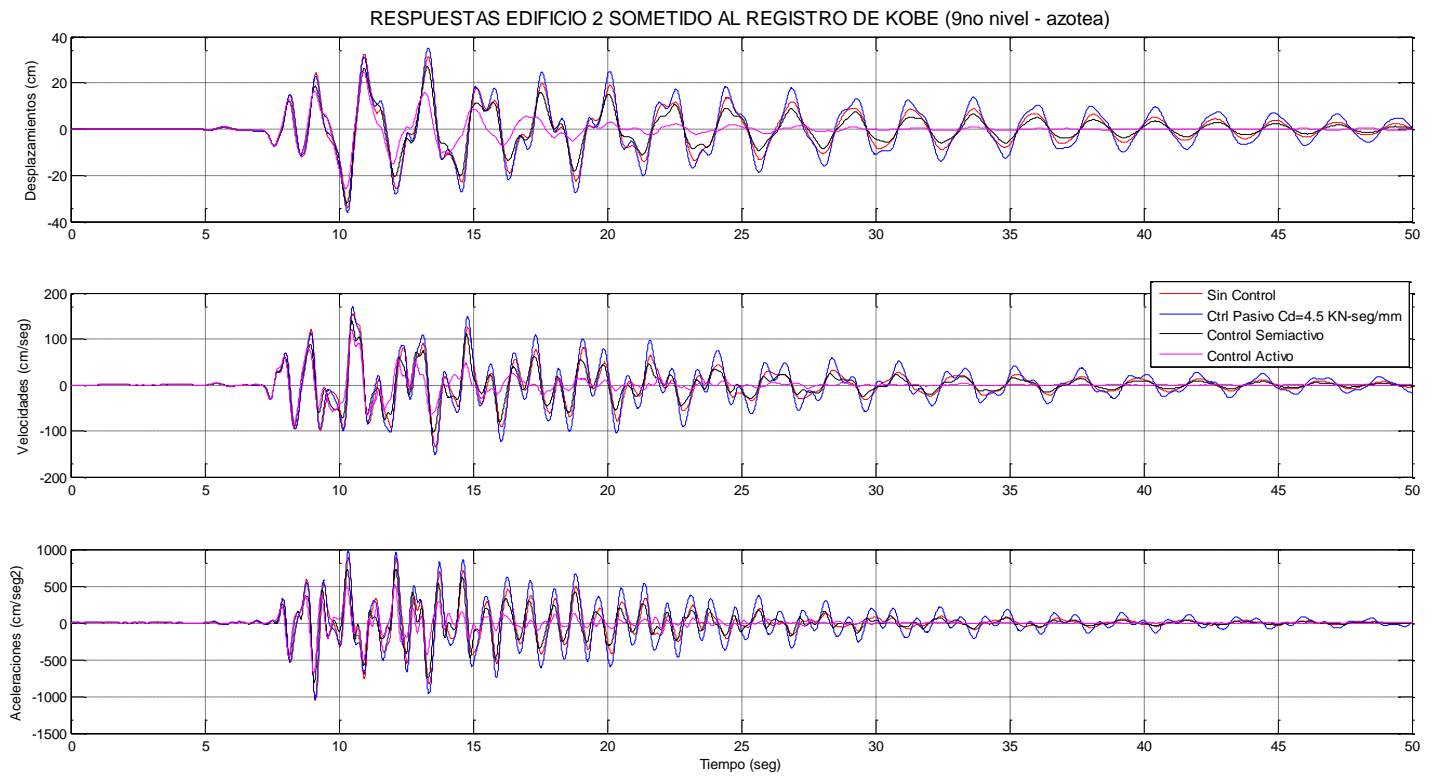
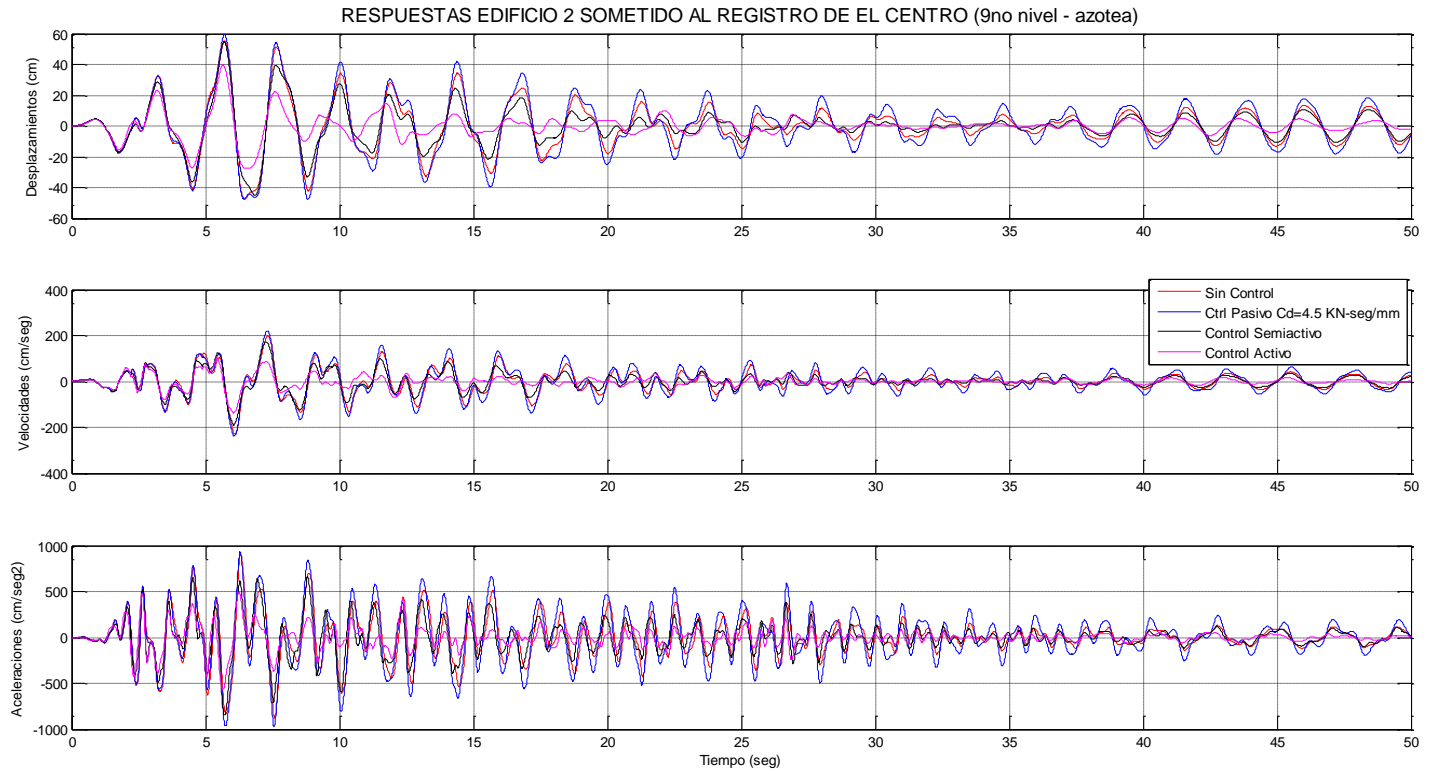


Fig. 5.6 – Respuestas Máximas Edificio 1 para diferentes excitaciones (El Centro, Kobe y Taft)

Se presentan las respuestas del edificio 2 (nueve niveles):



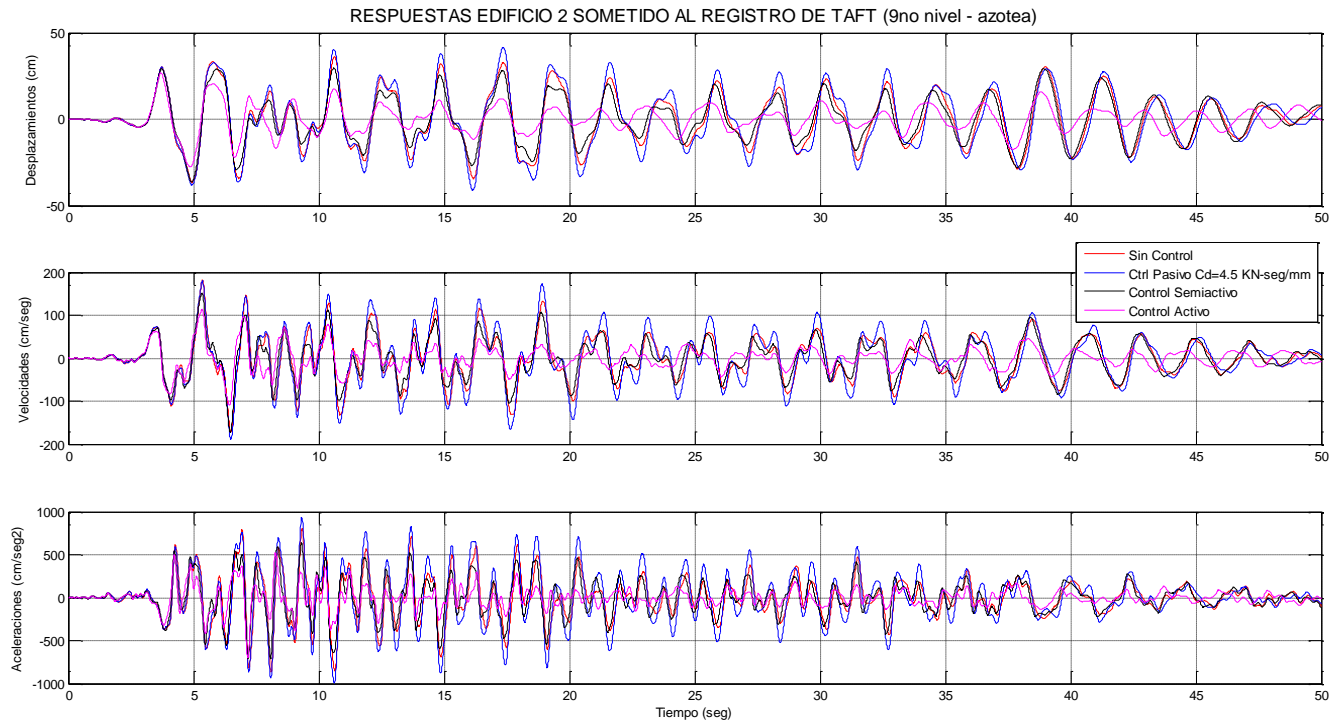


Fig. 5.7 – Respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones del Edificio 2 para diferentes registros

Las respuestas máximas del edificio 2 son mostradas en la siguiente figura:

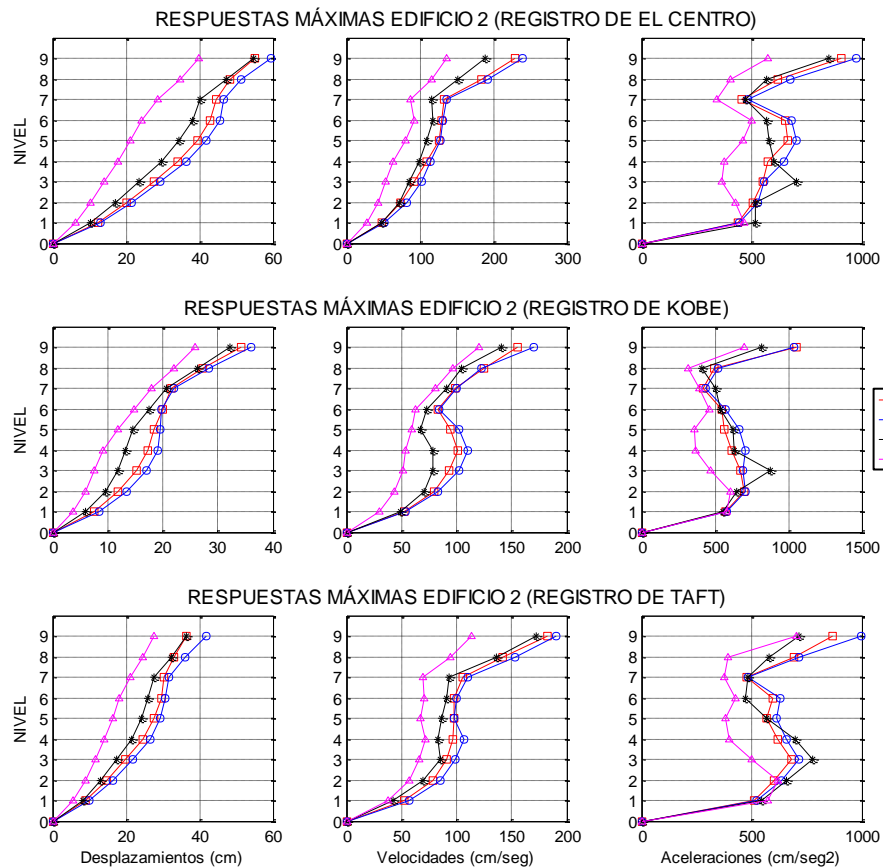


Fig. 5.8 – Respuestas Máximas Edificio 2 para diferentes excitaciones (El Centro, Kobe y Taft)

En las gráficas 5.5 y 5.6, se observa como los diferentes sistemas de control reducen las respuestas del edificio 1 (tres niveles). Resalta que el sistema activo es el más adecuado para reducir las respuestas. El sistema semiactivo también tiene una reducción importante de las respuestas, pero no alcanza el desempeño de un sistema activo.

El sistema pasivo considera un coeficiente de amortiguamiento óptimo que se determinó en el capítulo 4. Se observa que el sistema pasivo reduce las respuestas en comparación de un sistema desacoplado, pero no alcanza la capacidad de control de un sistema activo o semiactivo.

En la fig. 5.6, se aprecia que el desempeño de un sistema semiactivo es igual o mayor que un sistema activo; este fenómeno está relacionado con las características del dispositivo. Se realizaron varias simulaciones modificando los valores de f_{max} y c_{dmax} , y se pudo ver un aumento considerable en la capacidad de control. Esto apunta que a medida que la tecnología avanza, dispositivos semiactivos más modernos y poderosos pueden ser fabricados, lo que representa una brecha hacia el futuro del diseño sismorresistente con el uso de estos artefactos. Por ejemplo, en los estudios realizados por Kurata et al. en 1999 se utilizaron dispositivos semiactivos en un edificio de 5 niveles, en ese tiempo el dispositivo contaba con un $f_{max} = 900\text{KN}$ y $c_{dmax} = 200\text{KN-seg/mm}$, mientras que para el año 2003 ya se fabricaron dispositivos con casi el doble de capacidad.

La reducción de respuestas en el edificio 2 es más favorable para los sistemas activos, se observa en la figura 5.7 que los sistemas pasivo y semiactivo, si bien reducen los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, su reducción no es tan significativa como un sistema activo.

Cuando se consideran respuestas máximas (Fig. 5.8), la diferencia entre los diferentes sistemas es más grande. Sin duda, al considerar las respuestas del edificio 2 (nueve niveles), la mejor opción es un sistema activo. En las siguientes tablas se presenta la reducción de respuestas máximas de cada sistema, comparado cuando el sistema de edificios está desacoplado.

TABLA 5.1 - REDUCCIÓN DE LAS RESPUESTAS MÁXIMAS EDIFICIO 1 - 3er NIVEL (%)

SISTEMA	Excitación "El Centro"			Excitación "Kobe"			Excitación "Taft"		
	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel
Pasivo	32.65	28.15	16.60	11.87	8.68	8.26	26.21	17.84	14.51
Semiactivo	64.51	64.87	41.26	52.13	50.22	44.70	49.08	36.94	26.10
Activo	57.95	64.38	45.51	54.15	49.22	44.14	47.84	35.32	37.31

TABLA 5.2 - REDUCCIÓN DE LAS RESPUESTAS MÁXIMAS EDIFICIO 2 - 9no NIVEL (%)

SISTEMA	Excitación "El Centro"			Excitación "Kobe"			Excitación "Taft"		
	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel
Pasivo	-7.60	-3.98	-7.16	-5.74	-9.42	1.92	-14.13	-4.51	-14.70
Semiactivo	0.64	18.02	6.44	5.86	9.68	22.32	0.55	5.54	17.78
Activo	27.82	40.47	36.94	24.24	22.34	33.76	24.25	37.57	18.80

Se aprecia que los tres sistemas de control reducen las respuestas en el edificio 1. Mientras que en el edificio 2, sólo el sistema activo tiene una buena capacidad de control, el semiactivo reduce las respuestas en poca proporción y el sistema pasivo perjudica las respuestas (valores negativos)

5.5.1 Fuerzas de control efectivas (1 actuador)

En las siguientes figuras se presenta la variación de la magnitud de las fuerzas para cada tipo de control, ya sean debidas a un dispositivo pasivo, activo o semiactivo.

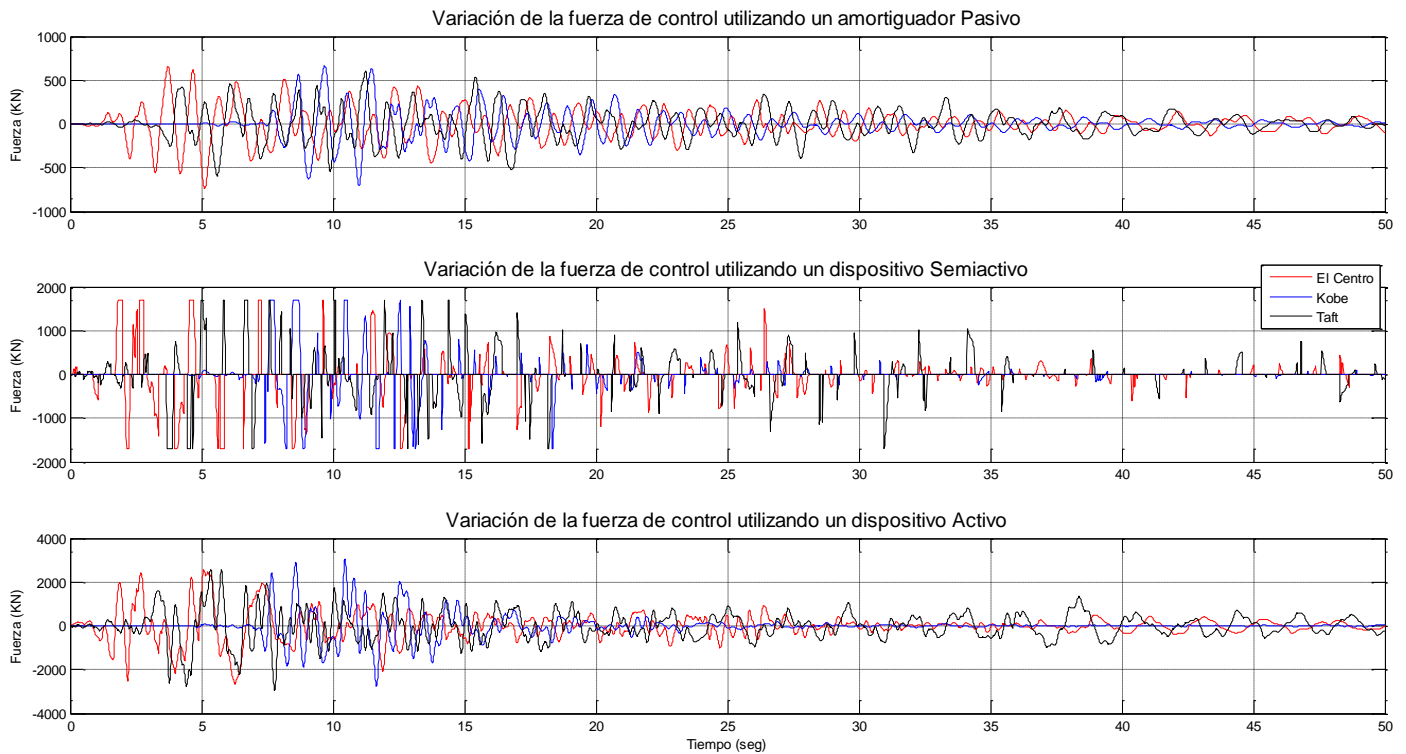


Fig. 5.9 – Variación de la fuerza durante la simulación

Si se calcula el valor de fuerza de control acumulada en cada ciclo, se obtiene:

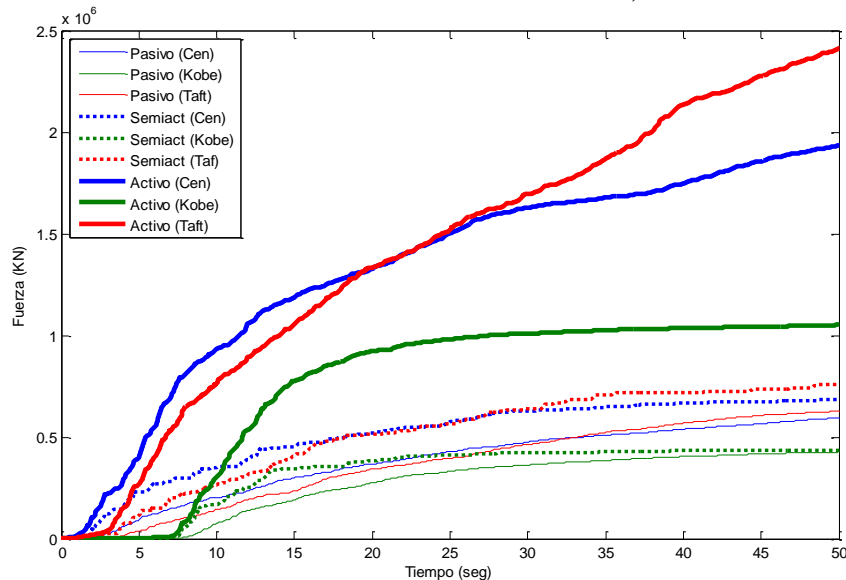


Fig. 5.10 – Fuerza de control acumulada a través del tiempo

La gráfica anterior representa la energía, en términos de fuerza, que cada sistema de control aplica durante la excitación producida por los diferentes acelerogramas. Se observa que el sistema de

control activo introduce una mayor cantidad fuerza acumulada que los otros sistemas de control, mientras que los sistemas semiactivos y pasivos son más próximos.

5.5.2 Disipación de energía y comando de fuerza

La gráfica de respuestas máximas es sólo un parámetro de comparación de la capacidad de control de los distintos sistemas. Otra manera de expresar la reducción de las respuestas es la disipación de energía de cada uno de los sistemas, y se representa al graficar el desplazamiento que sufre el pistón versus la fuerza que ejerce.

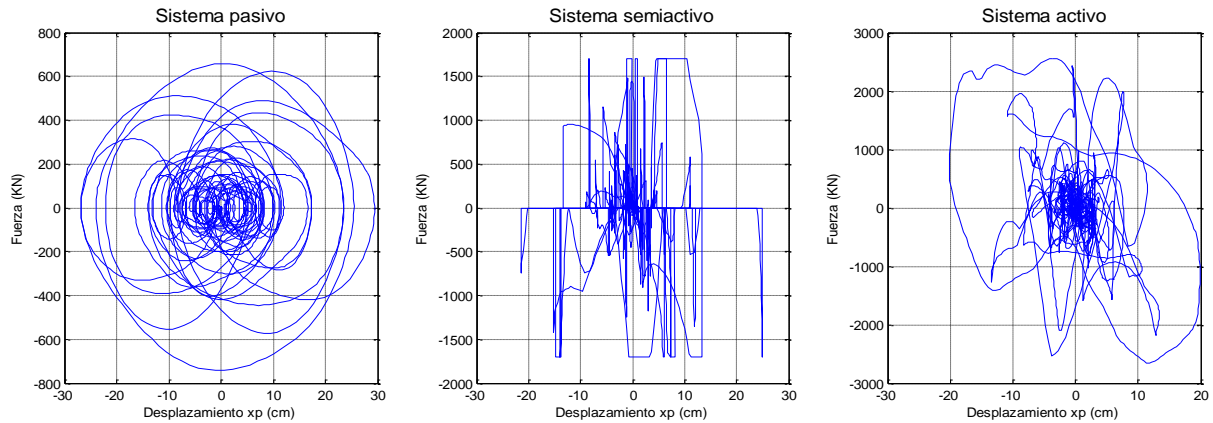


Fig. 5.11 – Disipación de energía de los dispositivos para el registro de ‘El Centro’

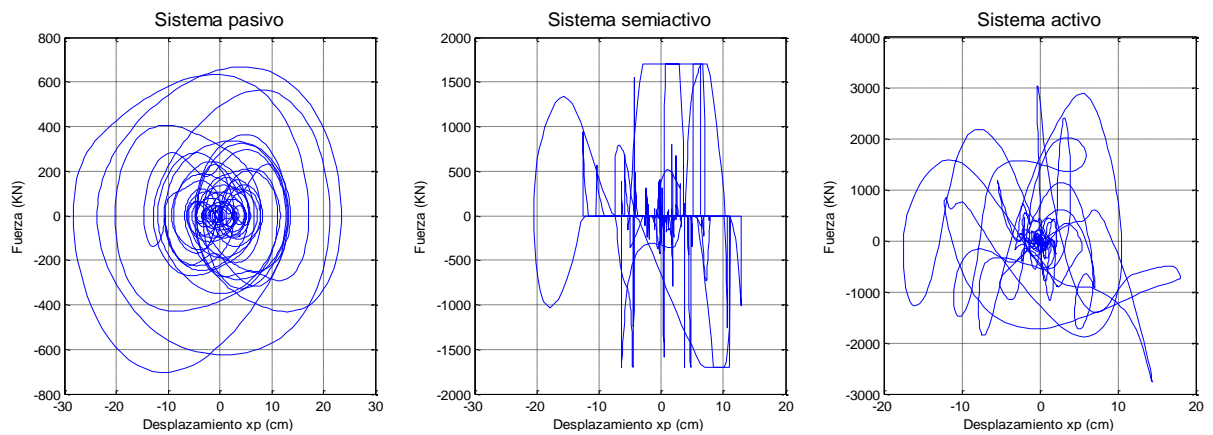


Fig. 5.12 – Disipación de energía de los dispositivos para el registro de ‘Kobe’

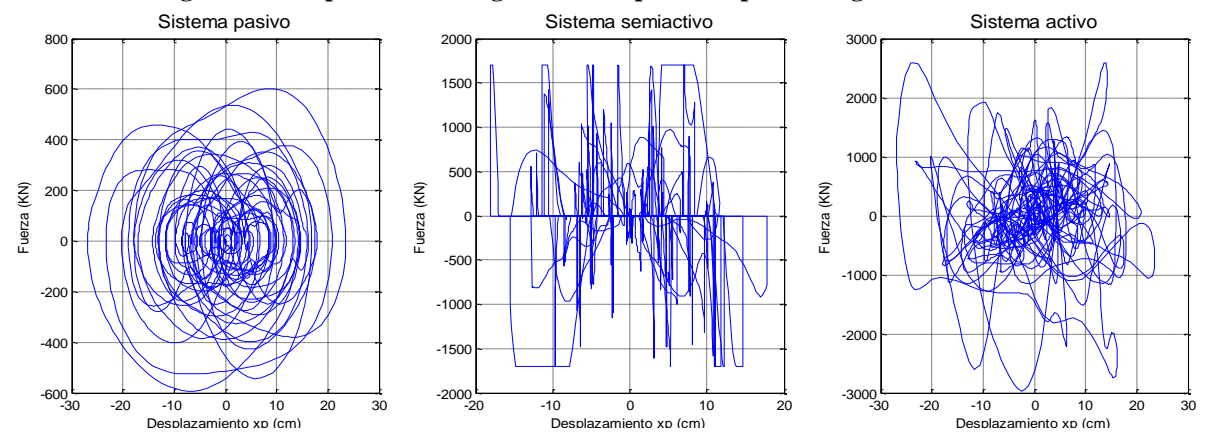
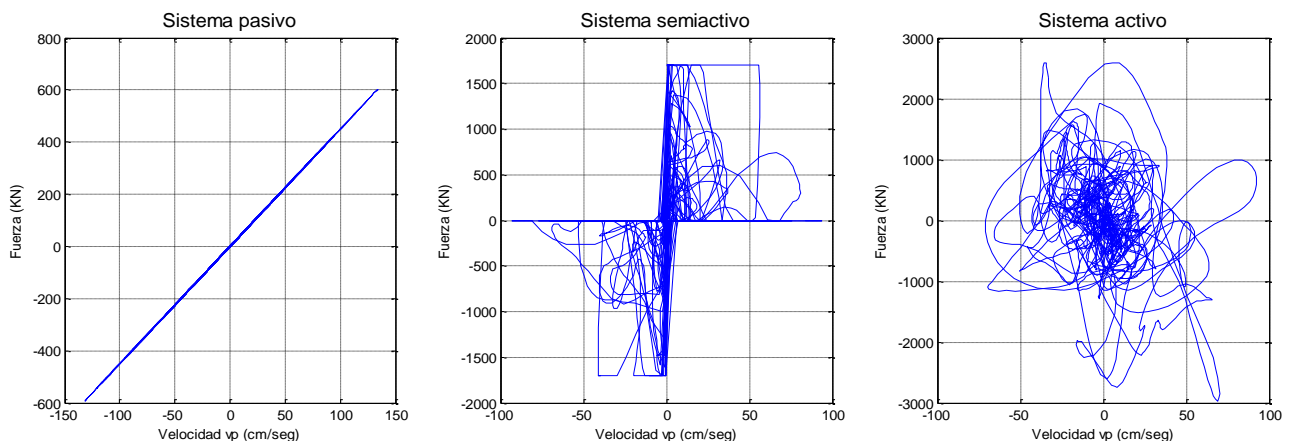
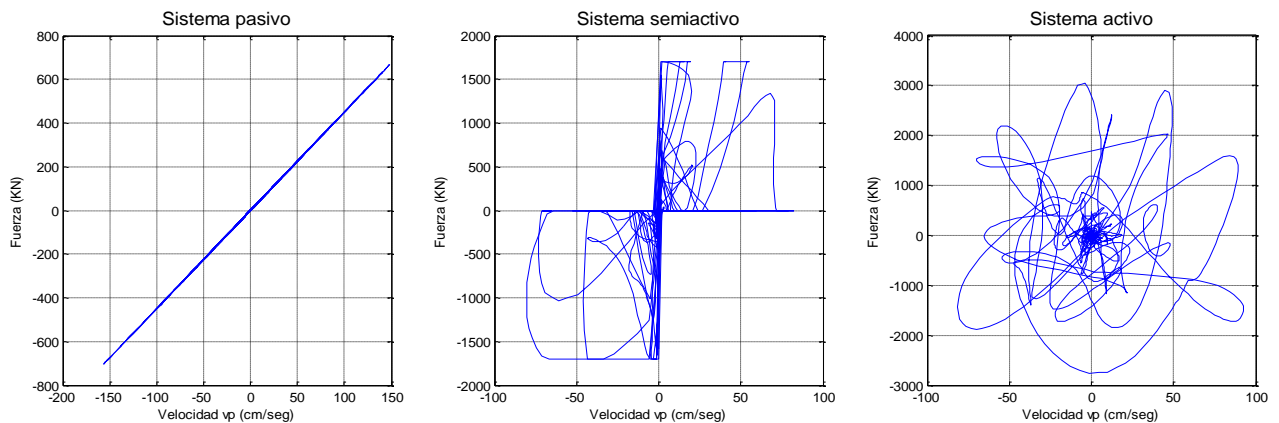
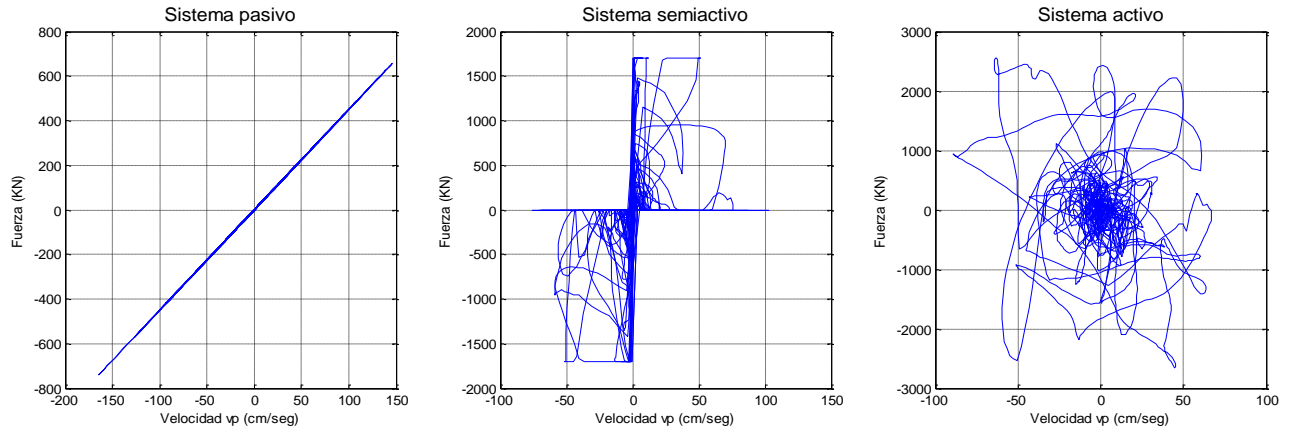


Fig. 5.13 – Disipación de energía de los dispositivos para el registro de ‘Taft’

En las figuras 5.11 a 5.13 se aprecia que los sistemas de control activos alcanzan valores de la fuerza de control mayores que los semiactivos y pasivos, lo que podría suponer que tienen una mayor disipación de energía. Sin embargo, si se considera que el gasto de energía requerido por un dispositivo semiactivo es muy bajo, se concluye que éste tiene cierta ventaja sobre un sistema activo.

Ahora, si se grafica la velocidad del dispositivo versus la fuerza de control, se obtiene:



Las gráficas 5.14 a 5.16, representan el comando de fuerza de los dispositivos de control. Por ejemplo, el cuadrante de acción de un sistema pasivo, oscilara respecto al valor del coeficiente de amortiguamiento c_d , ya que el único valor variable es la velocidad. En un sistema activo el comando de fuerza tiene su campo de acción en los cuatro cuadrantes; es decir, el dispositivo de control puede “empujar” y “jalar”, para contrarrestar las excitaciones externas. En un sistema semiactivo, el campo de acción se limita a dos cuadrantes; es decir, solamente actúa en la misma dirección de la velocidad del edificio. El valor de las fuerzas está limitado por las características del dispositivo (f_{max} y c_{dmax}) (Fig. 517).

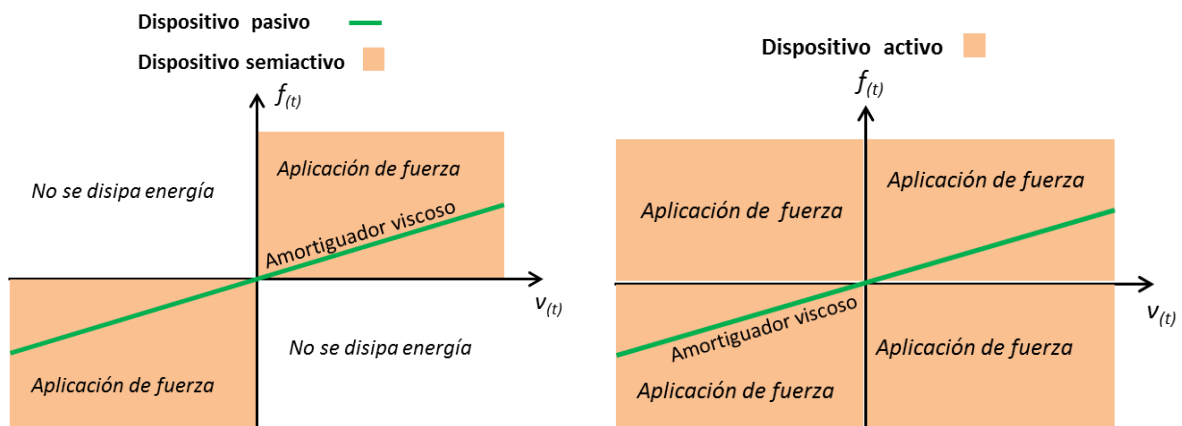


Fig. 5.17 – Cuadrantes de acción de los sistemas de control (Dyke et al. 1996)

El comportamiento de la Fuerza-Velocidad del sistema acoplado (Fig. 5.14 a 5.16) y las curvas teóricas (Fig. 5.17) es similar. Se observa que la disipación de energía de un sistema semiactivo se limita a dos cuadrantes, donde la fuerza máxima alcanzable es el valor de $f_{max}=1700$ KN (punto 5.2.2) o cuando el producto de la v_i x c_{dmax} sea alcanzado.

5.5.3 Distorsiones de entrepiso y cortante basal

En puntos anteriores se presentan resultados relacionados con la dinámica estructural de los modelos y características de los diferentes sistemas de control. A continuación se analiza el comportamiento del edificio considerando las limitaciones que proponen las normas y reglamentos.

Las distorsiones de entrepiso para ambos edificios (tres y nueve niveles) se determinaron para los diferentes sistemas de control, y cuando los edificios están desacoplados. Se aprecia que para las diferentes aceleraciones de terreno consideradas, el comportamiento es parecido. El sistema activo y semiactivo reducen las distorsiones en el edificio 1 casi en la misma proporción (Fig. 5.18), mientras que la reducción del sistema pasivo no es muy consistente. Para el edificio 2, el sistema activo tiene un mejor comportamiento que el semiactivo, mientras que el pasivo perjudica la reducción de distorsiones (Fig. 5.19).

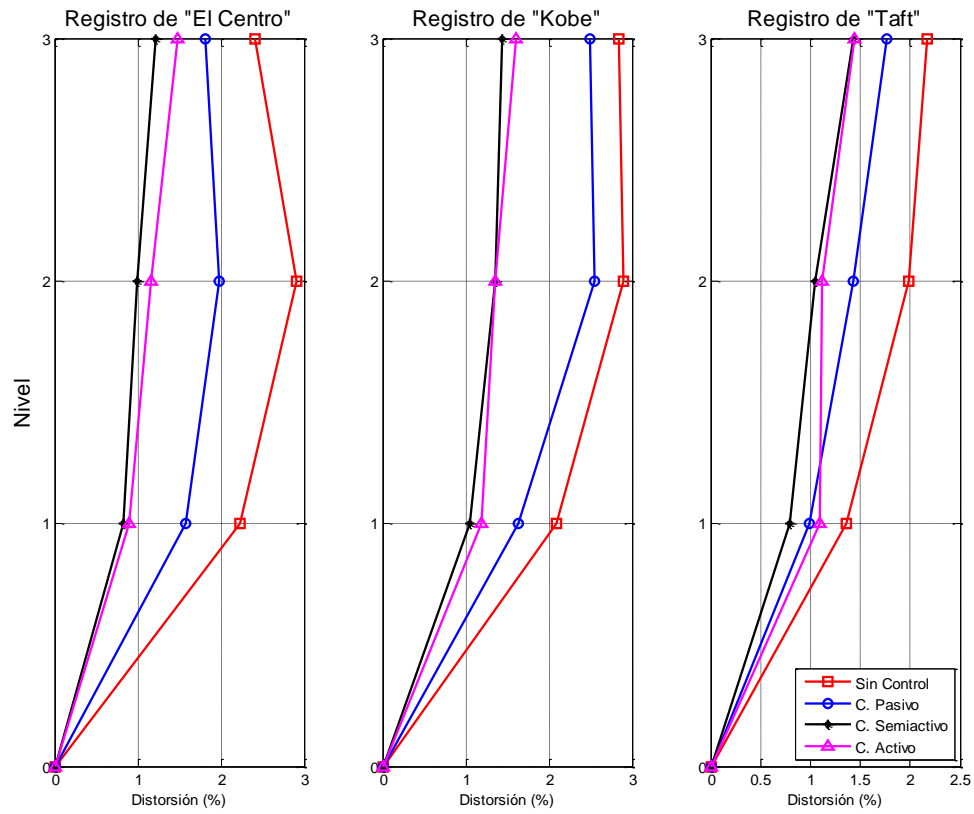


Fig. 5.18 – Distorsiones de entrepiso para el Edificio 1 (tres niveles)

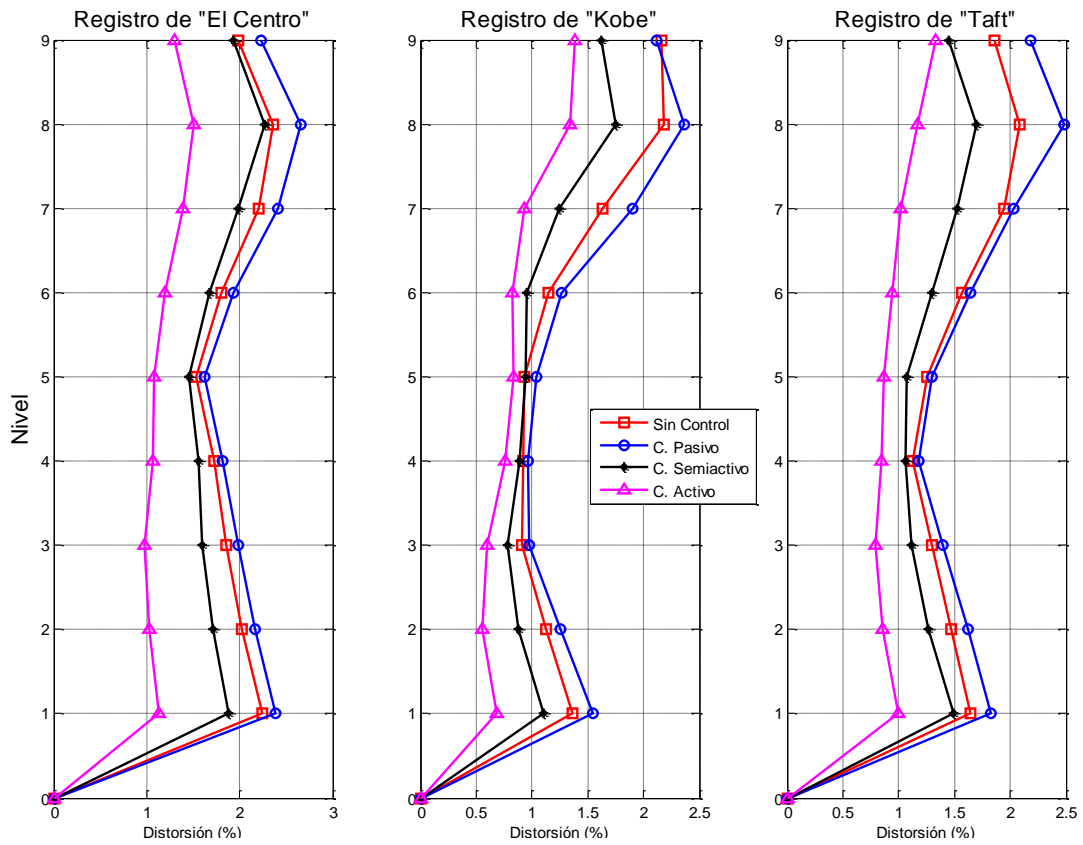


Fig. 5.19 – Distorsiones de entrepiso para el Edificio 2 (nueve niveles)

En la figura 5.20, se aprecia la reducción del cortante basal del edificio 1. El sistema semiactivo tiene un buen desempeño respecto a los demás sistemas de control.

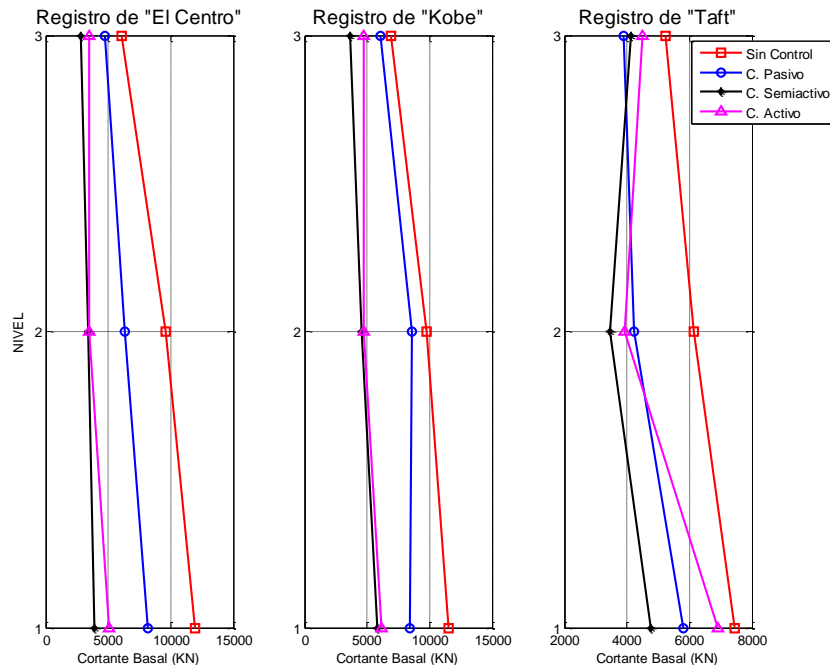


Fig. 5.20 – Reducción del cortante basal Edificio 1

En el caso del edificio 2, se observa que el sistema activo tiene una mejor reducción del cortante basal que sus similares pasivo y semiactivo. De hecho, el sistema pasivo no contribuye en la reducción de las respuestas.

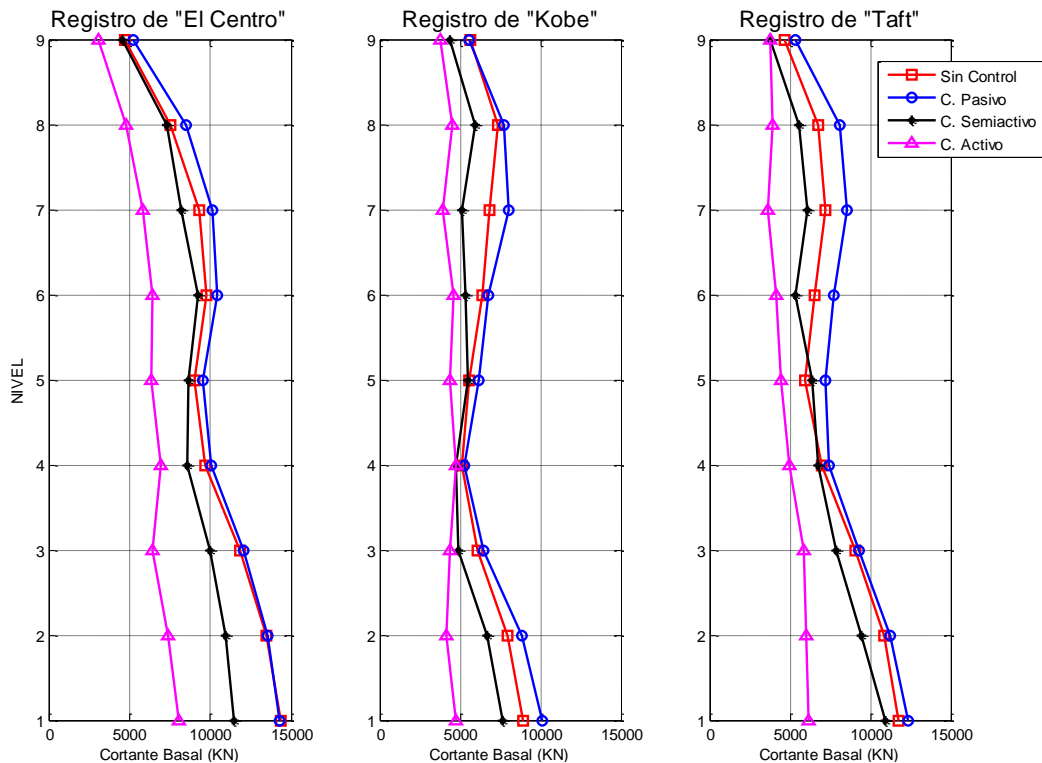
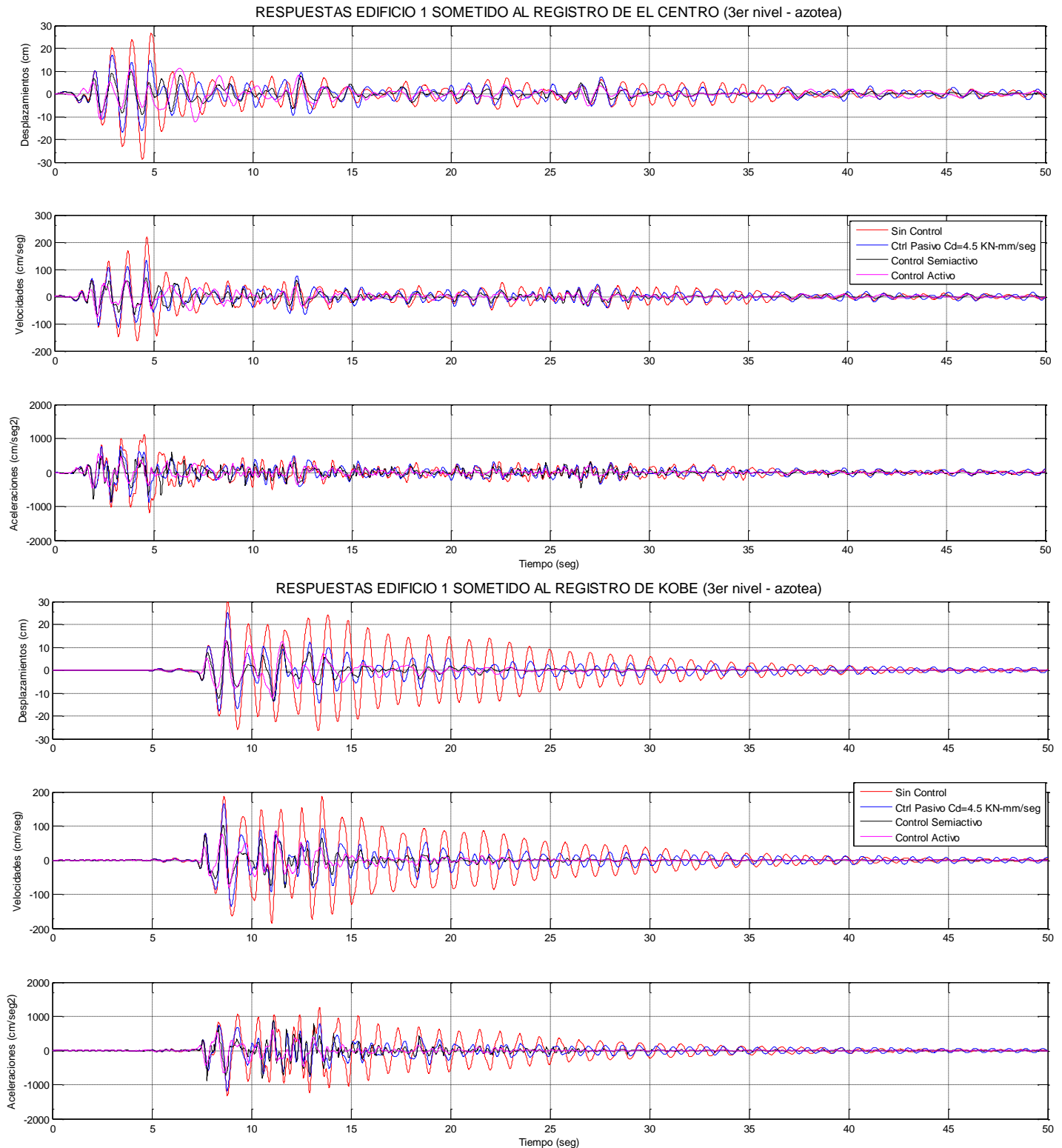


Fig. 5.21 – Reducción del cortante basal Edificio 2

5.6 MODELOS DE EDIFICIOS ACOPLADOS CON TRES DISPOSITIVOS DE CONTROL

Similar al punto anterior, ahora se realiza el modelado del sistema acoplado, pero considerando tres dispositivos de control, ubicados en el 1er, 2do y 3er nivel de cada estructura (Fig. 5.4a).



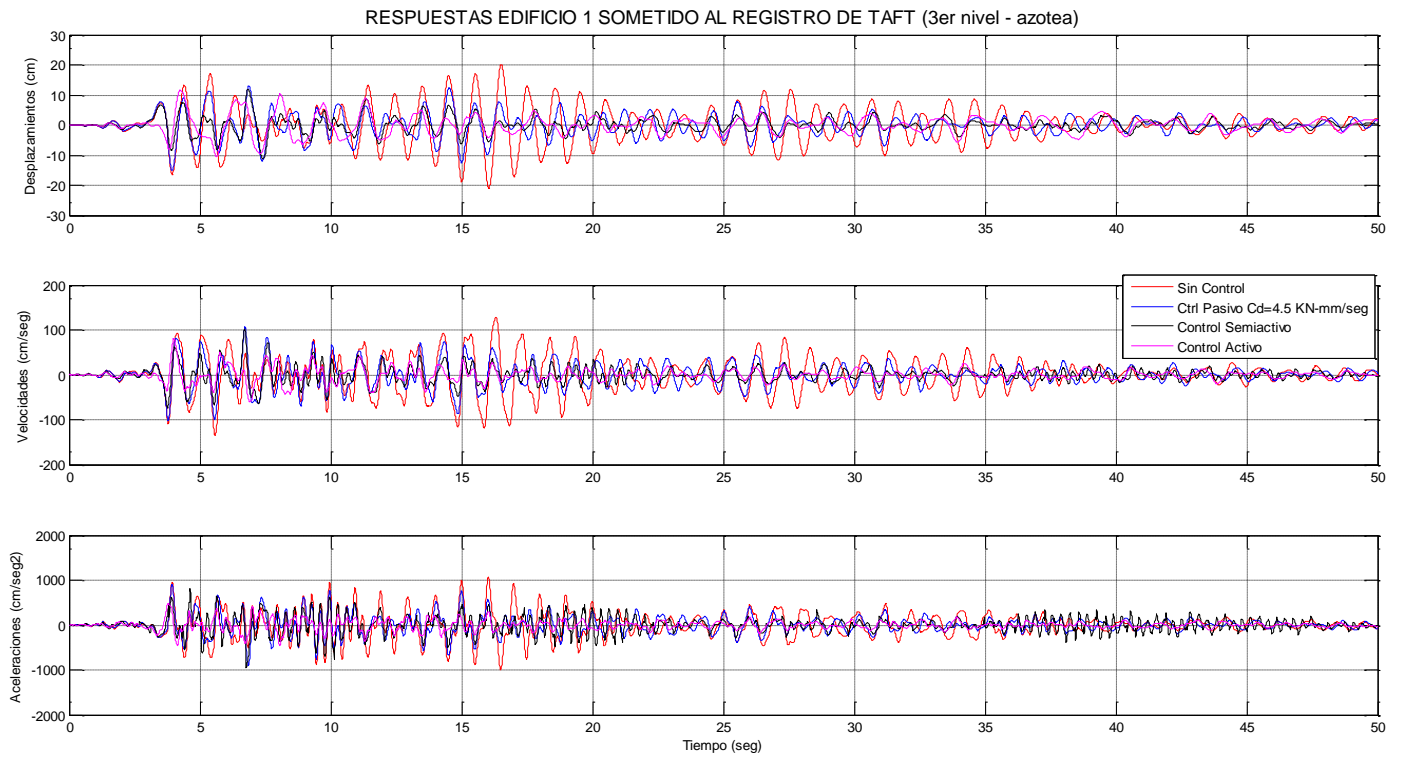


Fig. 5.22 – Respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones del Edificio 1 (tres amortiguadores)

Al evaluar los valores máximos de cada respuesta se tiene:

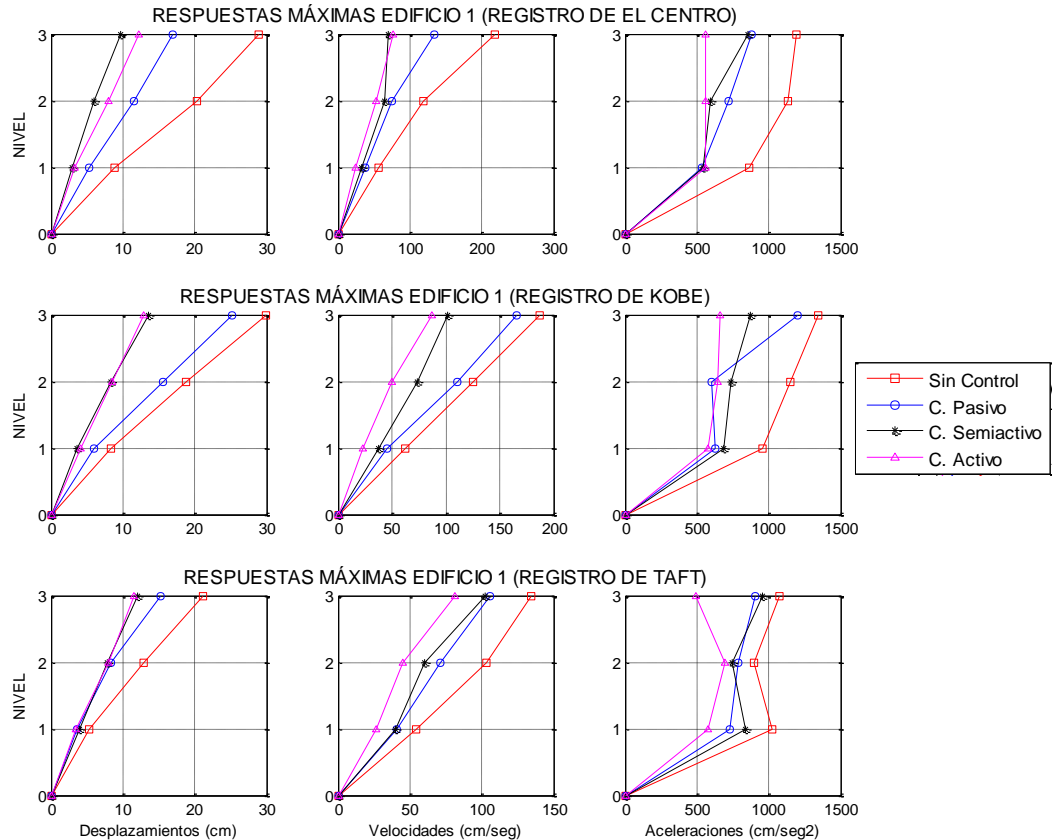
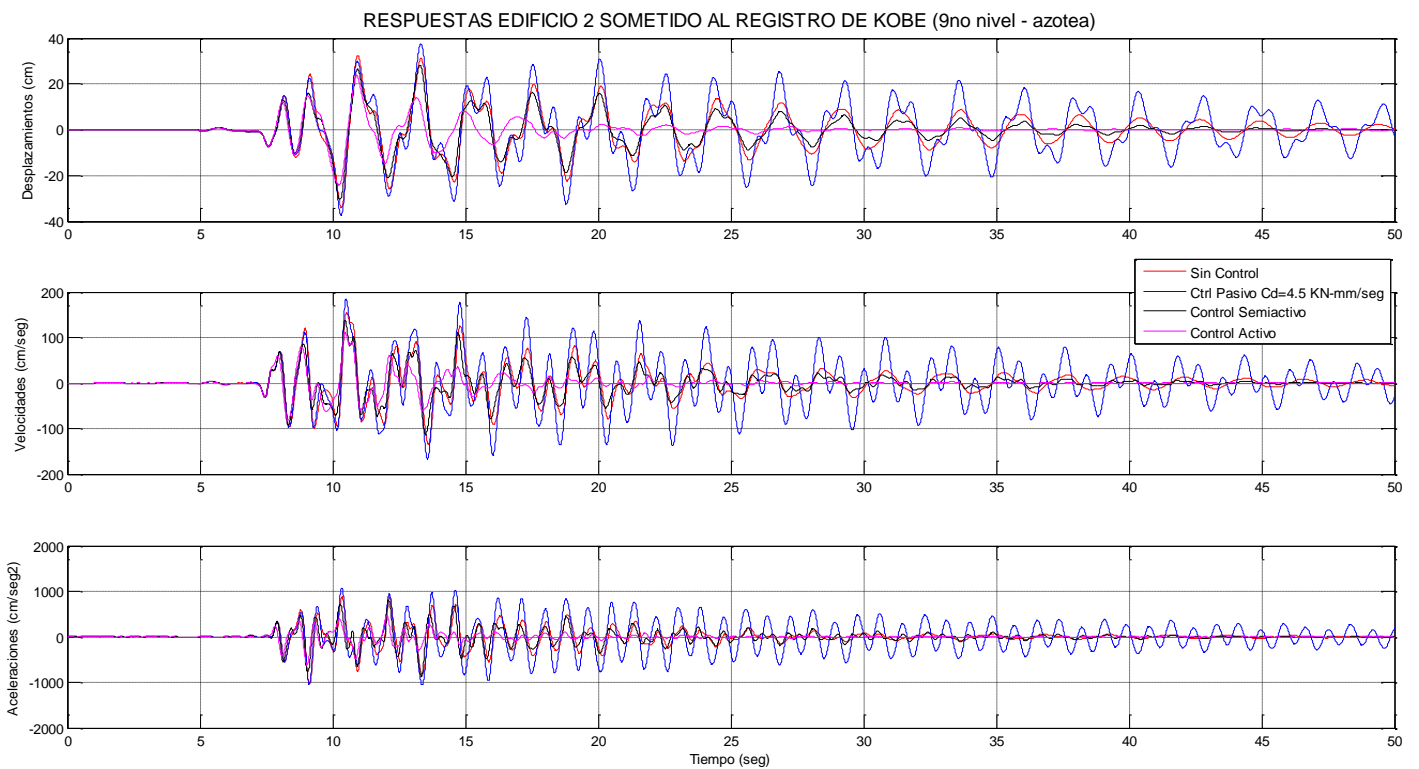
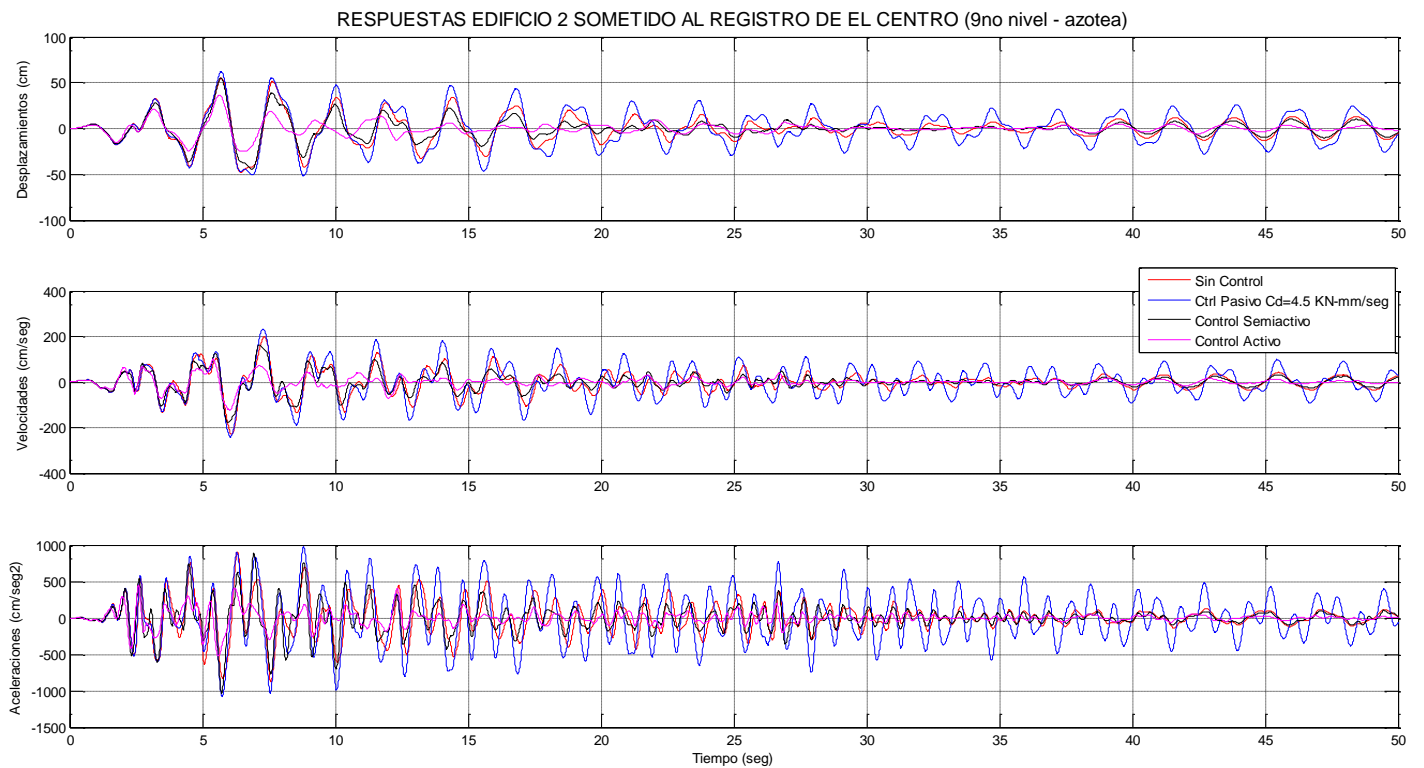


Fig. 5.23 – Respuestas Máximas Edificio 1 considerando tres amortiguadores (El Centro, Kobe y Taft)

A continuación se muestran la reducción de respuestas del edificio 2 (nueve niveles) para las diferentes excitaciones.



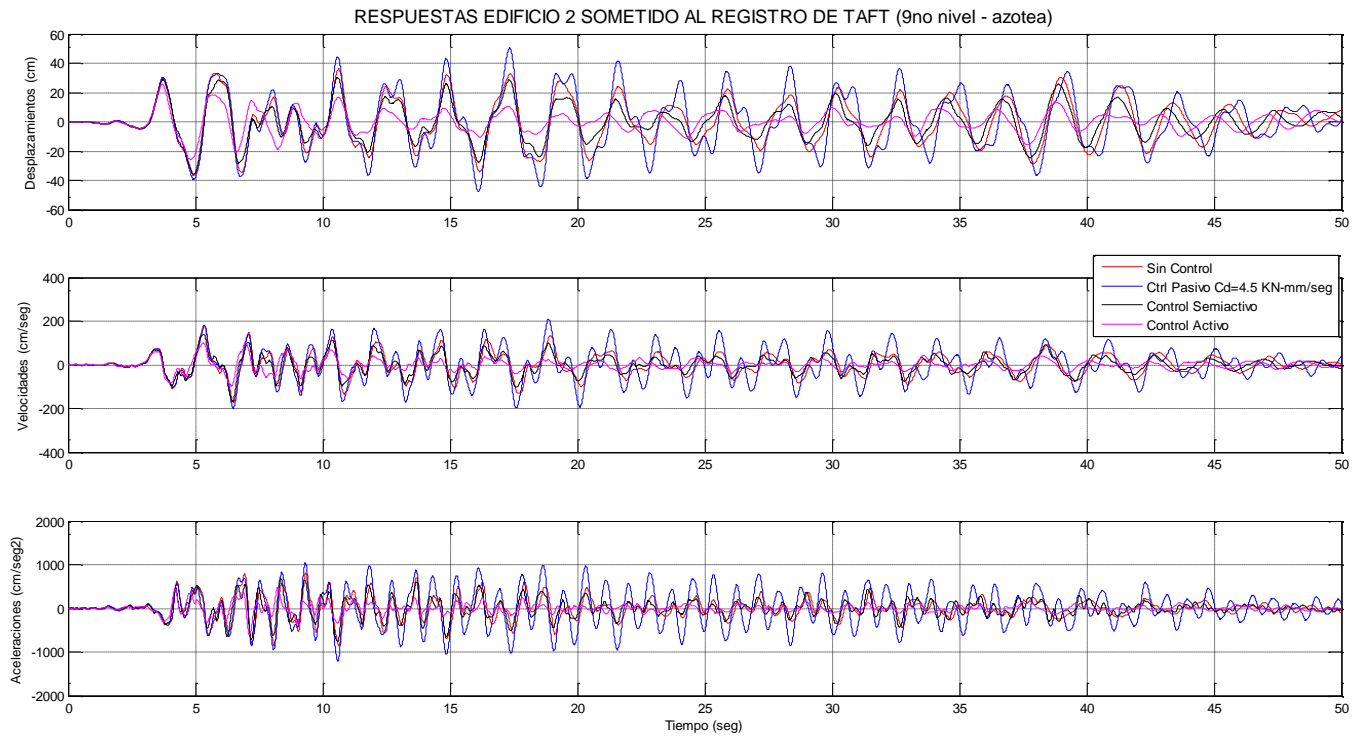


Fig. 5.24 Respuestas en desplazamientos, velocidades y aceleraciones del Edificio 2 (tres amortiguadores)

Al evaluar las respuestas máximas de cada componente se tiene:

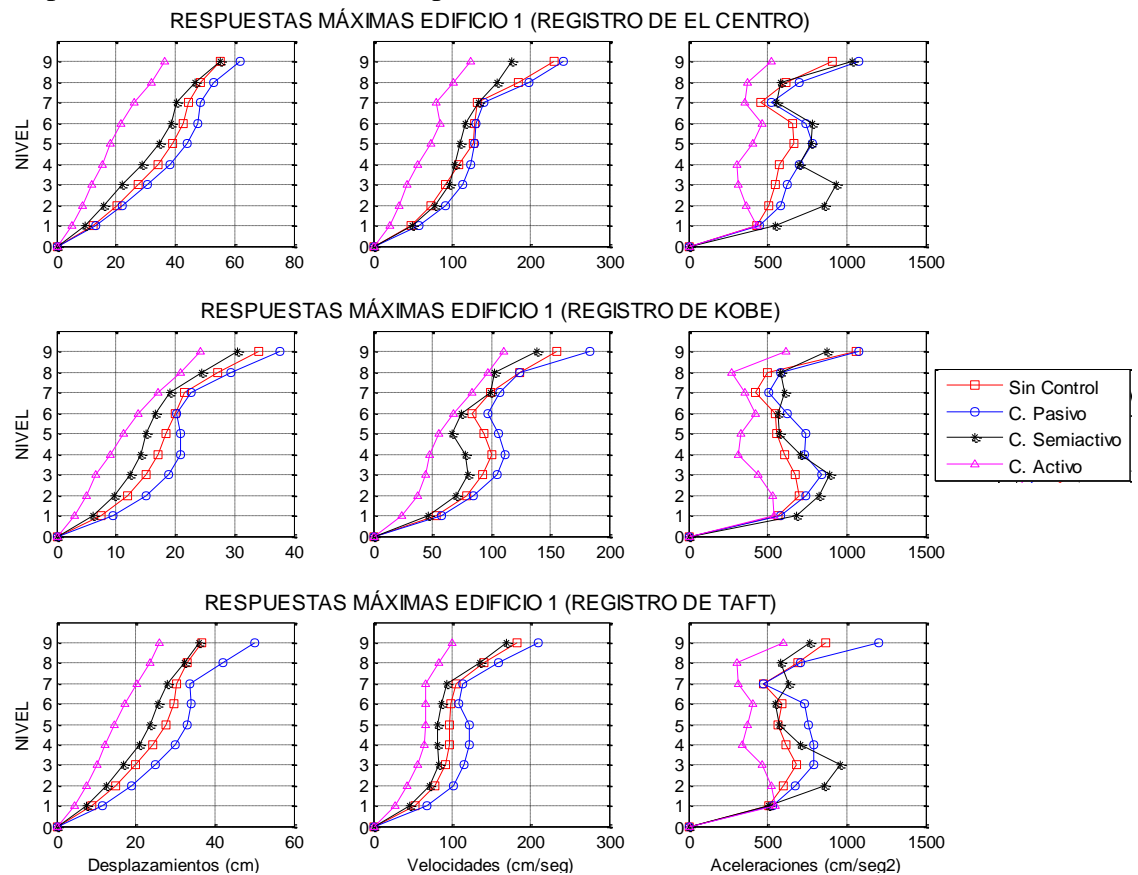


Fig. 5.25 – Respuestas Máximas Edificio 2 considerando tres amortiguadores (El Centro, Kobe y Taft)

En las figuras 5.22 y 5.23 se aprecia como los tres dispositivos de control reducen las respuestas en el edificio 1. En este caso los elementos semiactivos tienen cierta ventaja en la reducción de desplazamientos que los otros métodos, mientras que en velocidades y aceleraciones los sistemas activos tienen un buen comportamiento.

Para el edificio 2 (Fig. 5.24 y 5.25), de la misma manera que en el caso con un amortiguador, el sistema activo tiene una capacidad de control mayor que las demás alternativas. En este caso el sistema pasivo contribuye a la reducción de las respuestas a diferencia del primer caso (con un amortiguador). Se observa que el sistema semiactivo tiene un impacto fuerte en las aceleraciones en los casi todos los niveles, mientras cuando se considera un amortiguador (Fig. 5.8) el impacto sólo afecta el tercer nivel (donde se encuentra el controlador).

En las tablas 5.3 y 5.4 se presentan la reducción de las respuestas traducidos en porcentajes:

TABLA 5.3 - REDUCCIÓN DE LAS RESPUESTAS MÁXIMAS EDIFICIO 1 - 3er NIVEL - Tres amortiguadores (%)

SISTEMA	Excitación "El Centro"			Excitación "Kobe"			Excitación "Taft"		
	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel
Pasivo	41.29	38.58	26.02	16.11	11.10	10.53	28.00	21.29	15.10
Semiactivo	66.39	67.83	27.93	54.92	45.71	34.76	43.29	24.03	10.61
Activo	57.61	64.75	52.61	57.26	53.38	50.83	45.52	39.64	54.04

TABLA 5.4 - REDUCCIÓN DE LAS RESPUESTAS MÁXIMAS EDIFICIO 2 - 9no NIVEL - Tres amortiguadores (%)

SISTEMA	Excitación "El Centro"			Excitación "Kobe"			Excitación "Taft"		
	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel	Desp	Vel	Acel
Pasivo	-12.38	-4.82	-18.51	-10.14	-18.29	-2.28	-37.37	-15.30	-38.53
Semiactivo	0.43	23.32	-14.24	10.62	10.72	17.42	1.46	7.09	11.77
Activo	33.77	46.40	42.20	29.20	28.70	41.33	28.59	44.75	31.06

5.6.1 Fuerzas de control efectivas (tres actuadores)

Las fuerzas de control en cada dispositivo se distribuyen entre los tres niveles a medida que las excitaciones del terreno se incrementan. En las siguientes figuras se muestra la variación de la fuerza de cada dispositivo (Fig. 5.26) a lo largo del tiempo.

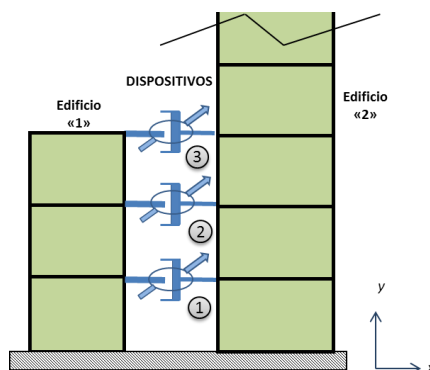


Fig. 5.26 – Distribución de dispositivos en los modelos acoplados considerados

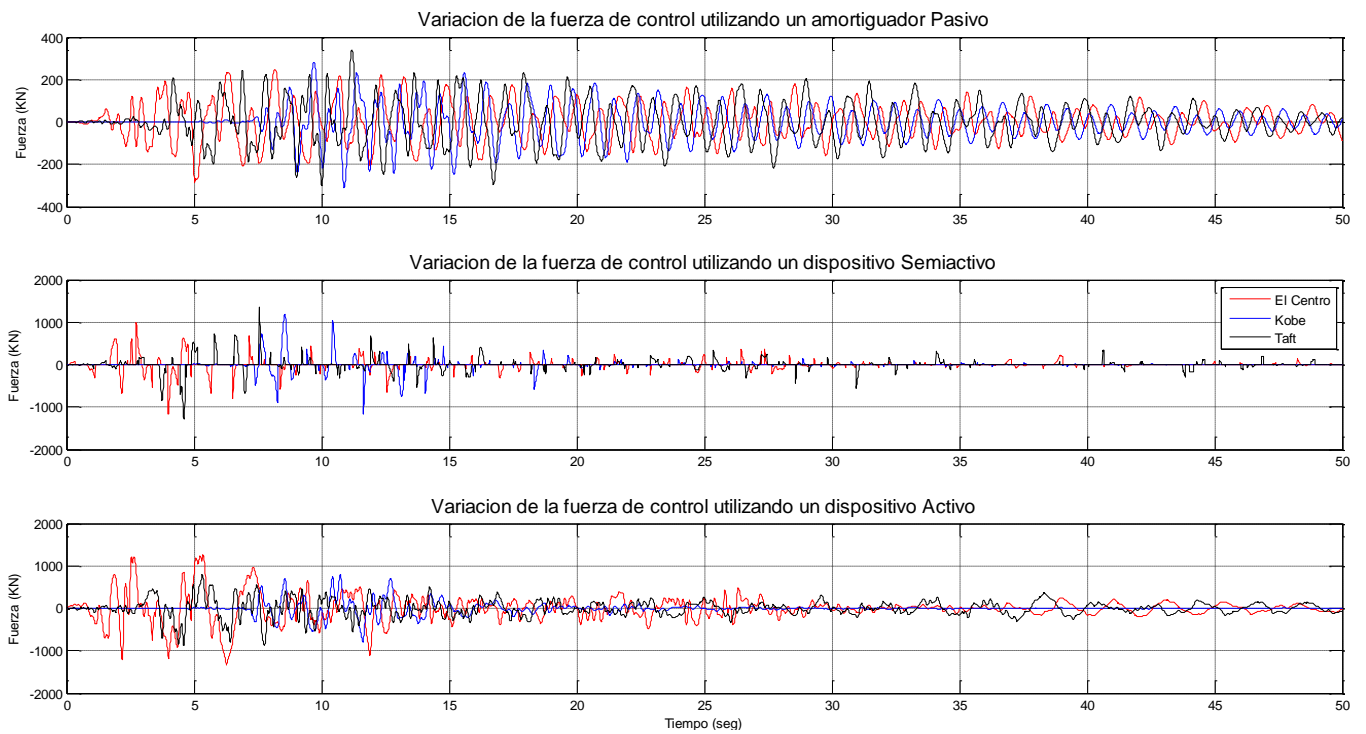


Fig. 5.27 – Fuerzas de control versus Tiempo, para el dispositivo No1 (1er nivel)

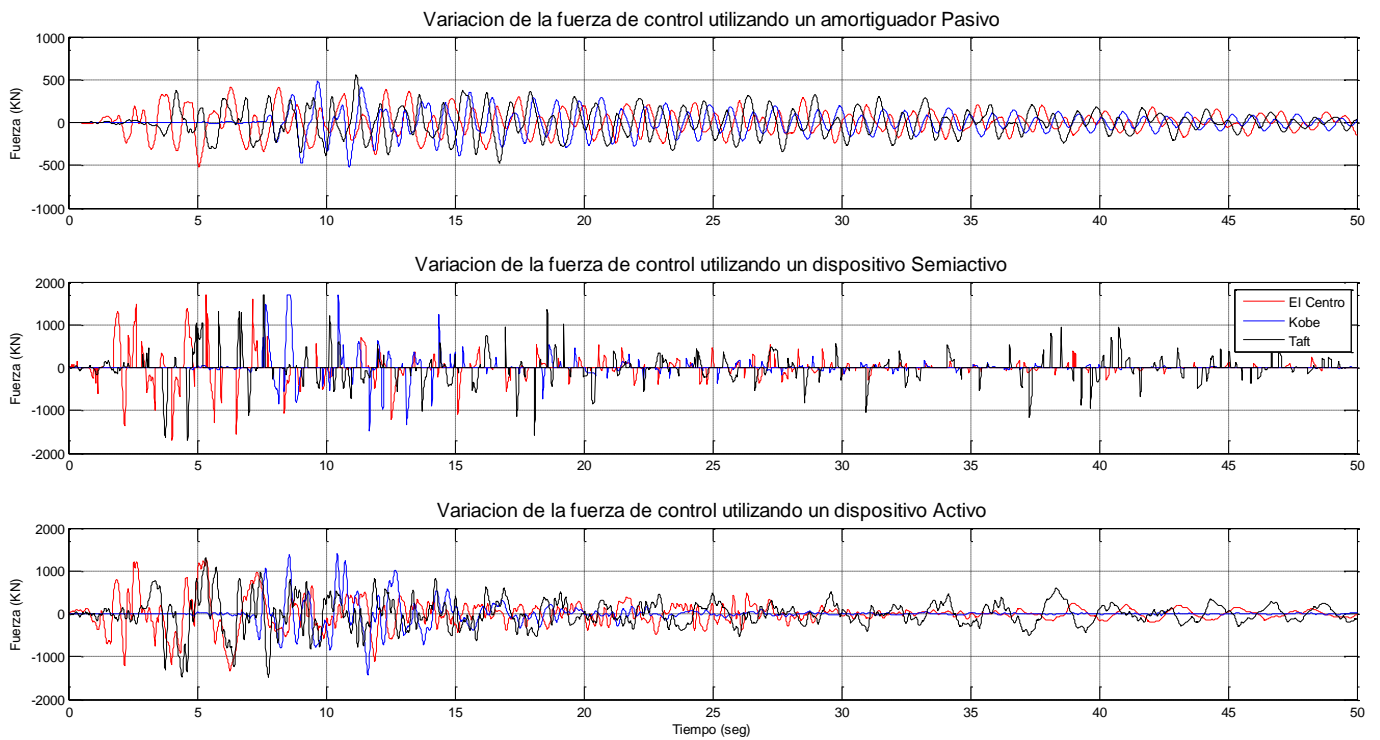


Fig. 5.28 – Fuerzas de control versus Tiempo, para el dispositivo No2 (2do nivel)

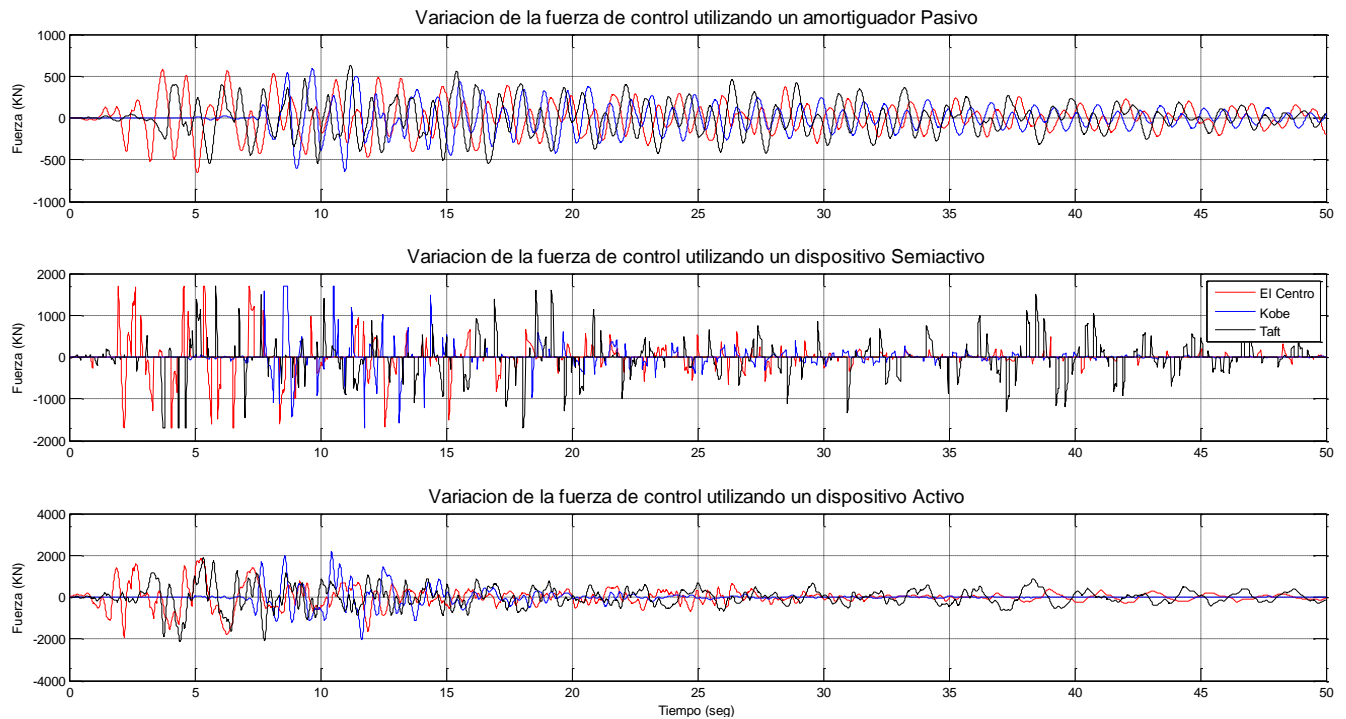
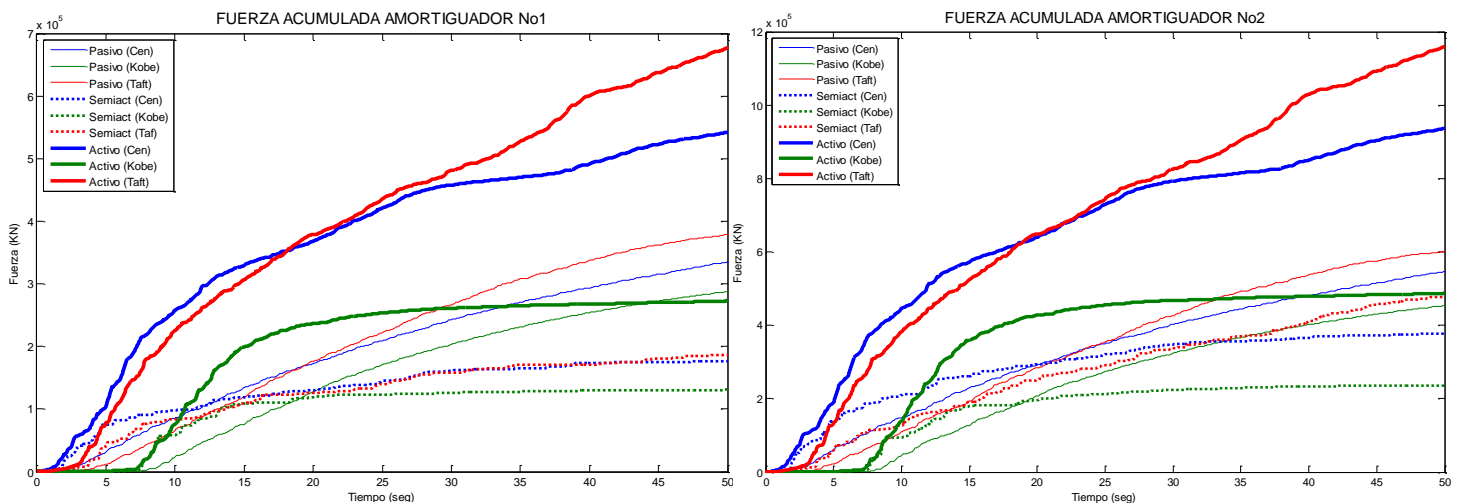


Fig. 5.29 – Fuerzas de control versus Tiempo, para el dispositivo No3 (3er nivel)

Si se analizan las figuras 5.27 a 5.29, se observa que el dispositivo del 3er nivel es el más demandado. Las fuerzas disminuyen a medida que los elementos de control se encuentren más próximos al suelo. Por ejemplo, el controlador semiactivo del primer nivel nunca llega a su valor máximo $f_{max}=1700$ kN (Fig. 5.27), mientras que el dispositivo ubicado en el tercer nivel si alcanza su fuerza máxima f_{max} (Fig. 5.29).

La siguiente gráfica muestra el valor acumulado de la fuerza de control que ejerce cada dispositivo. Se observa que el comportamiento de las curvas es similar para los diferentes dispositivos; sin embargo, el valor acumulado del dispositivo No3 (3er nivel) es mayor que los demás, lo que implica que este dispositivo tiene un mayor porcentaje de contribución en la reducción de las respuestas.



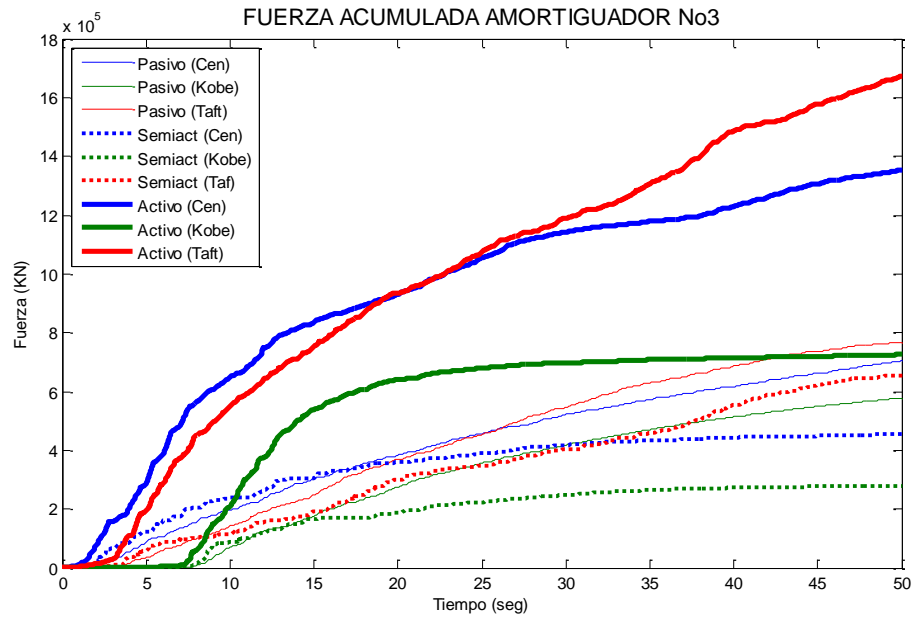


Fig. 5.30 – Fuerza de control acumulada de cada dispositivo (No 1, 2 y 3)

5.6.2 Disipación de energía y comando de fuerza

Se evalúa la disipación de energía de cada dispositivo que está representada por el desplazamiento del pistón y la fuerza que ejerce el controlador. En éste caso, el comportamiento de un amortiguador viscoso se asemeja a curvas elípticas (figs. 5.31 a 5.33). Mientras que para un dispositivo semiactivo, la fuerza es variable y responde a saltos abruptos. Para un dispositivo activo la trayectoria es variable y no responde a un patrón característico.

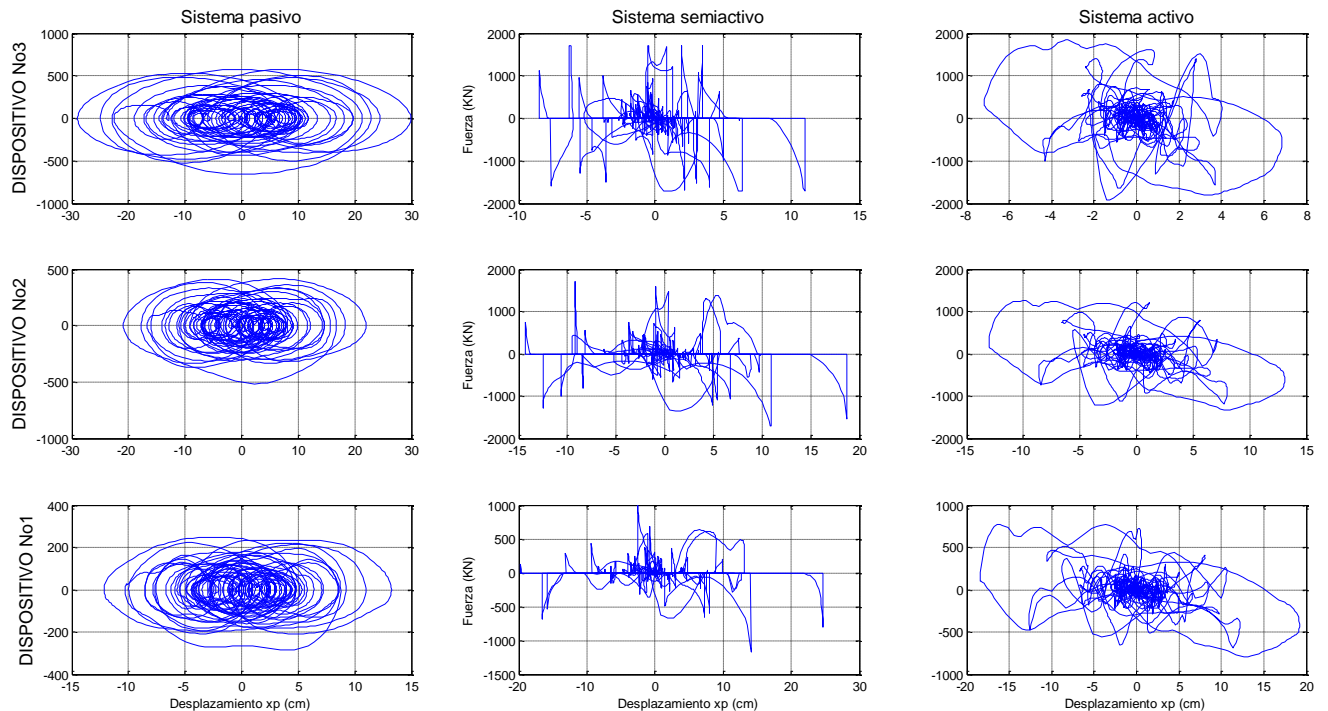


Fig. 5.31 – Disipación de energía (Fuerza versus Desplazamiento) de los dispositivos, registro de “El Centro”

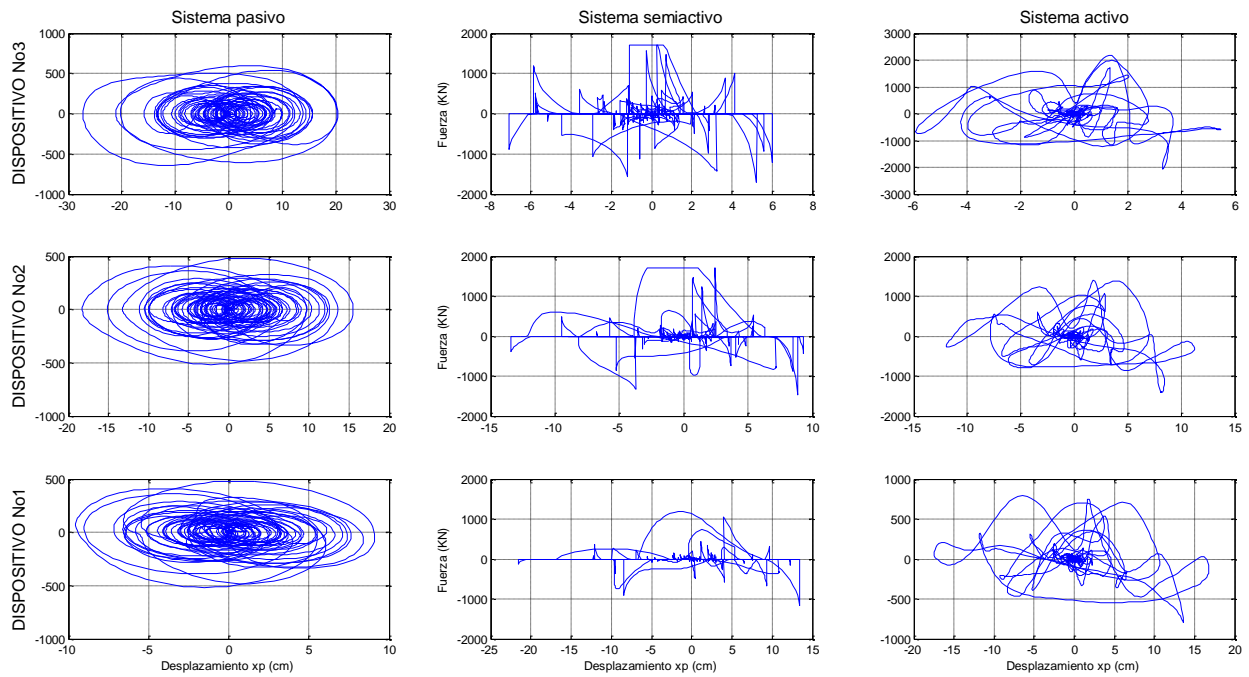


Fig. 5.32 – Disipación de energía (Fuerza versus Desplazamiento) de los dispositivos, registro de ‘Kobe’

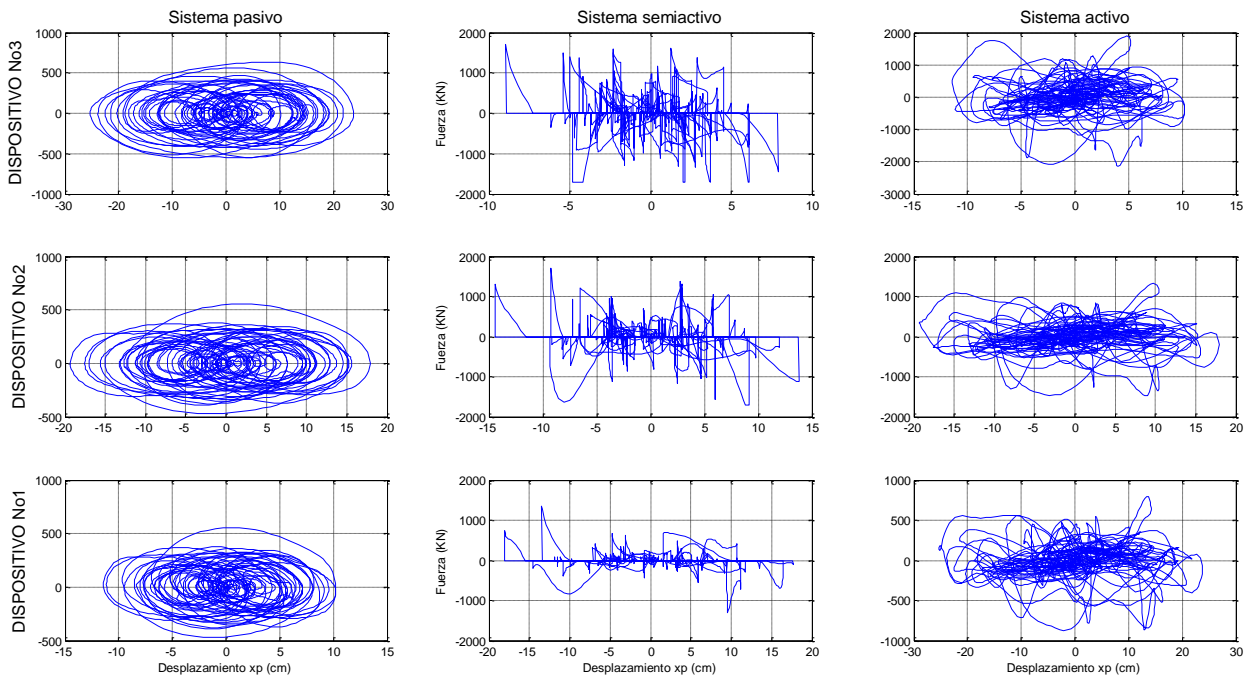


Fig. 5.33 – Disipación de energía (Fuerza versus Desplazamiento) de los dispositivos, registro de ‘Taft’

El comando de fuerza que actúa en los tres dispositivos también se evalúa. En las figuras 5.34 a 5.36 se muestran los resultados obtenidos para las diferentes excitaciones de terreno consideradas.

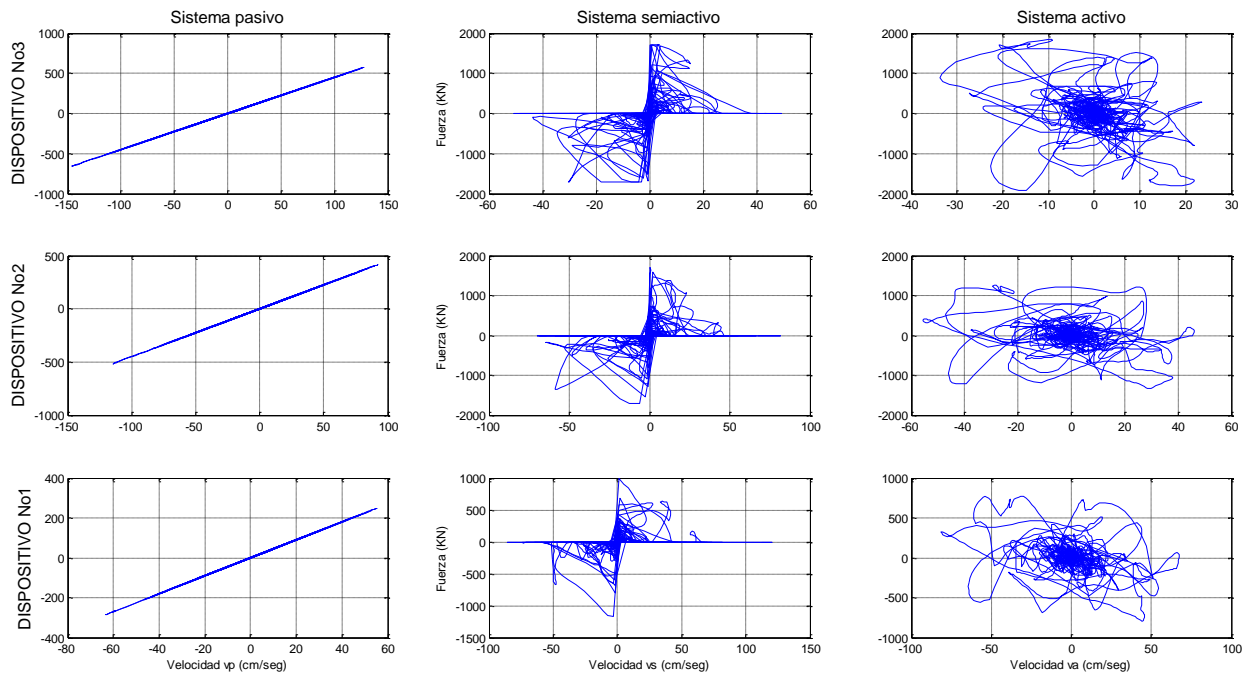


Fig. 5.34 – Comando de fuerza (Fuerza versus Velocidad) de los dispositivos, registro de ‘El Centro’

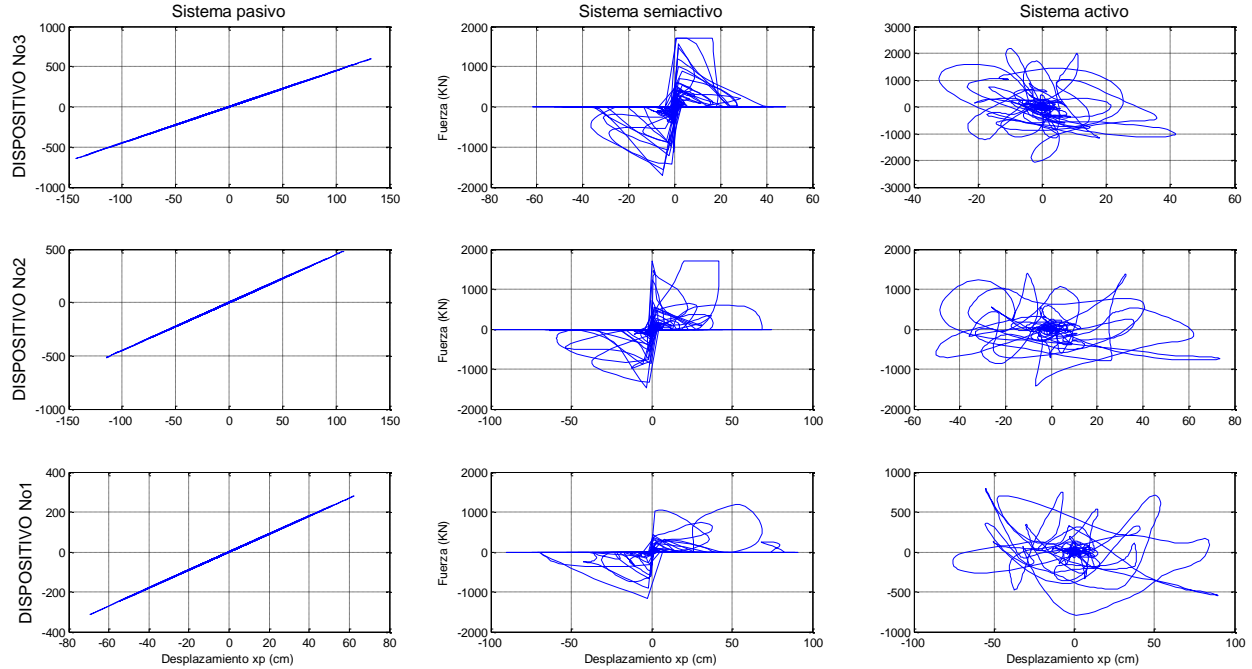


Fig. 5.35 – Comando de fuerza (Fuerza versus Velocidad) de los dispositivos, registro de ‘Kobe’

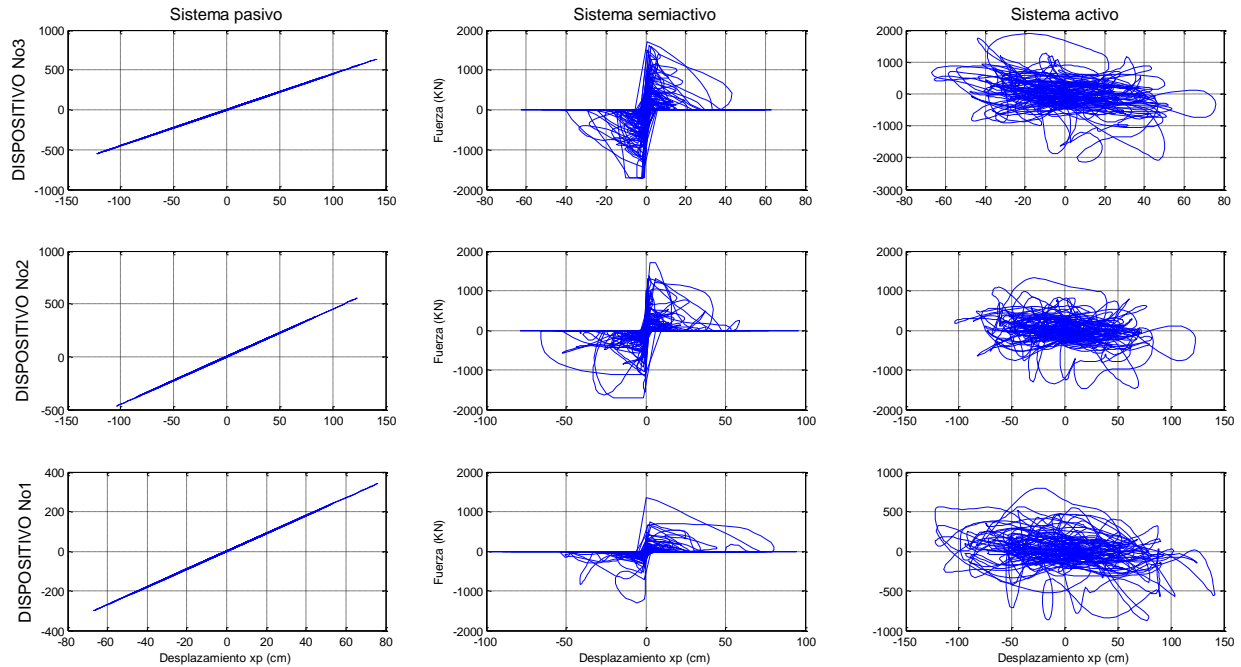


Fig. 5.36 – Comando de fuerza (Fuerza versus Velocidad) de los dispositivos, registro de "Taft"

En las figuras anteriores se aprecia que el comportamiento de los disipadores pasivos es lineal y el valor máximo lo desarrolla el amortiguador del 3er nivel. En los dispositivos semiactivos, la fuerza máxima alcanzada es 1700kN y el campo de acción se encuentra en dos cuadrantes. Para los activos, no existe una restricción de la fuerza y su dominio se encuentra en cuatro cuadrantes.

5.6.3 Distorsiones de entrepiso y cortante basal

Por último, se realiza el análisis de la estructura en su conjunto, para ello se evalúan las distorsiones de entrepiso de cada una.

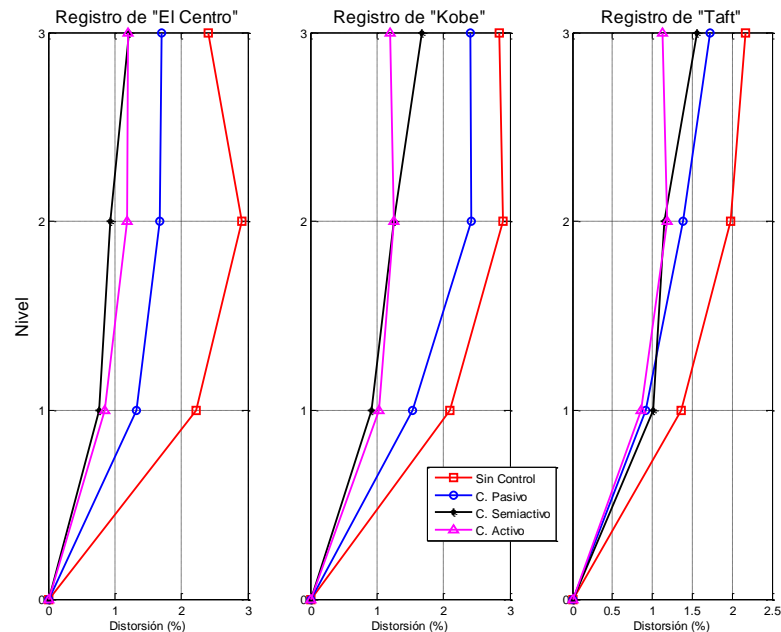


Fig. 5.37 – Distorsiones de entrepiso para el Edificio 1 (tres niveles)

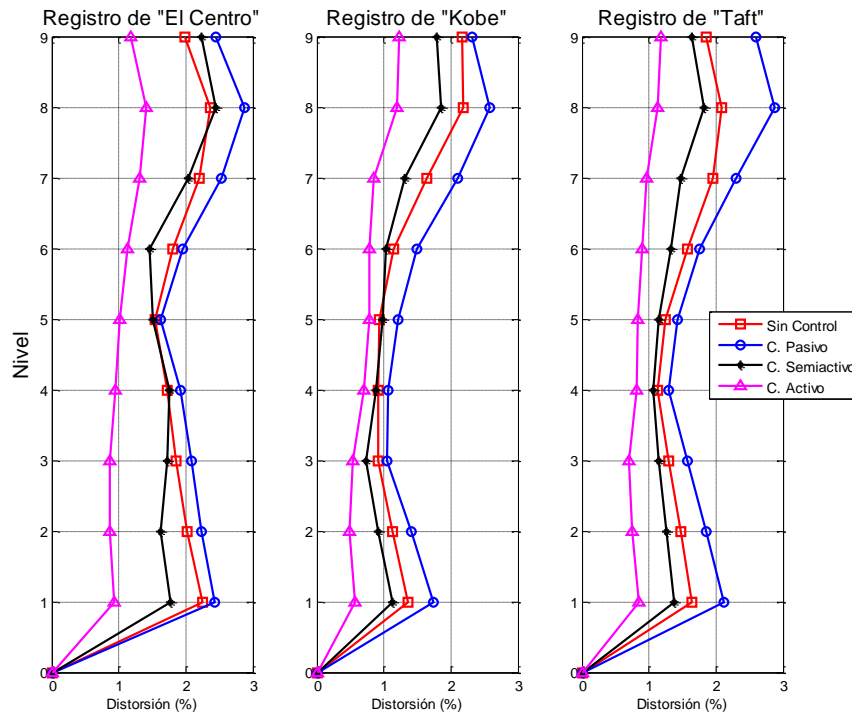


Fig. 5.38 – Distorsiones de entrepiso para el Edificio 2 (nueve niveles)

Para el edificio 1 (Fig. 5.37), la reducción de distorsiones es importante para los sistemas activo y semiactivo, mientras que los dispositivos pasivos ayudan a reducir las distorsiones pero en menor escala. Para el edificio 2, la reducción de distorsiones máximas es favorable para los sistemas de control activo. Los sistemas semiactivos reducen las distorsiones del edificio de nueve niveles pero en menor proporción que los activos, mientras que los dispositivos pasivos no tienen respuestas favorables en distorsiones.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del cortante basal de ambas estructuras:

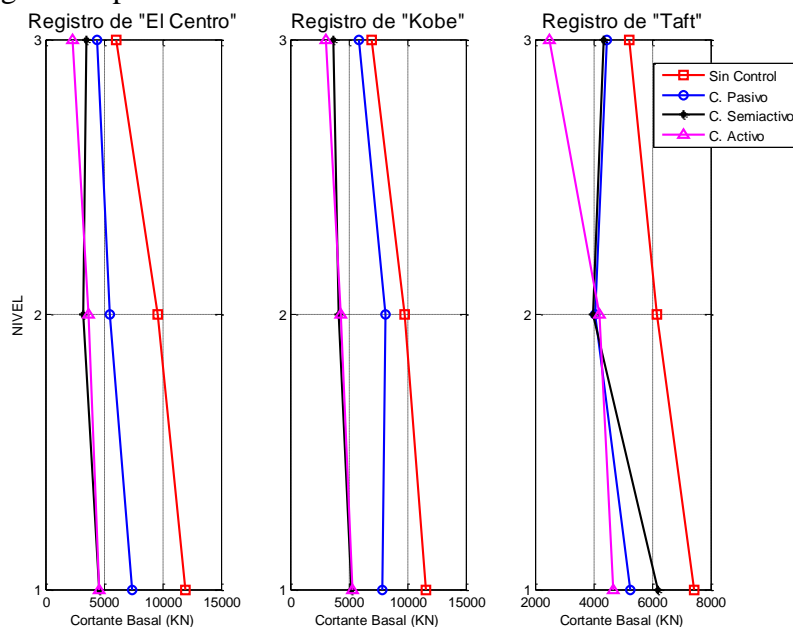


Fig. 5.39 – Cortante basal máxima Edificio 1 (tres niveles)

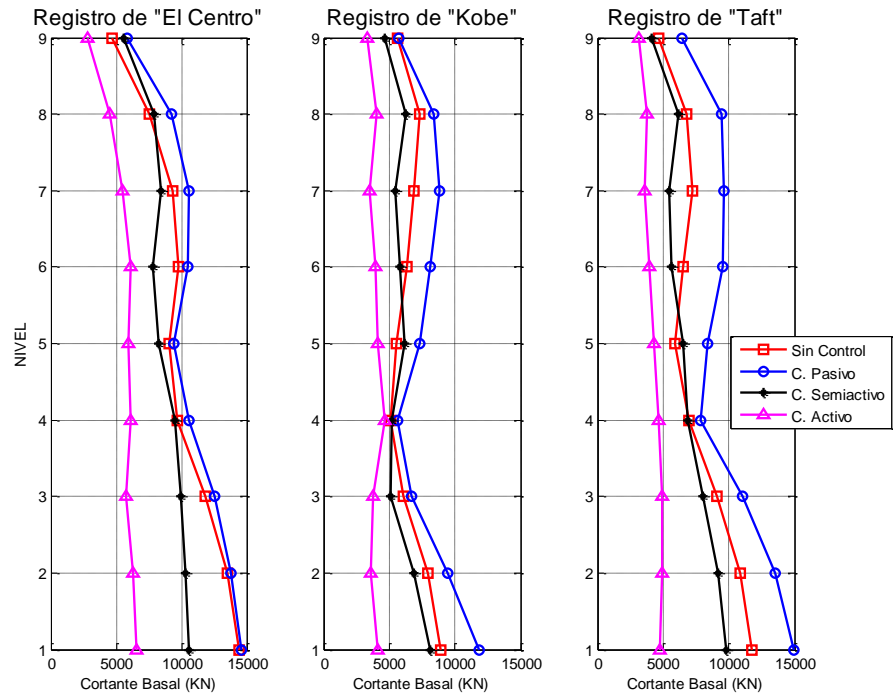


Fig. 5.40 – Cortante basal máxima Edificio 2 (nueve niveles)

De las figuras 5.39 y 5.40, se concluye que el cortante basal se reduce efectivamente al implantar un control activo. El sistema semiactivo tiene una importante contribución sólo en el edificio 1, mientras que la reducción en el edificio 2 es menos efectiva. El control pasivo ayuda a disminuir el cortante basal en el edificio 1, y por el contrario, tiene un impacto negativo en el edificio 2.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 ANÁLISIS DEL ESTUDIO Y RESULTADOS

6.1.1 Evaluación de la investigación

En el presente trabajo se cumplieron los siguientes objetivos:

Se estudiaron sistemas simples de estructuras acopladas (2GDL), para comprender los conceptos y particularidades de estos sistemas.

Se definieron modelos de edificios estándar de tres y nueve niveles, que representan estructuras típicas de mediana y baja altura, situados en una zona de alta sismicidad.

Se utilizaron amortiguadores viscosos en la azotea de cada modelo por separado y se determinó como esta variante en el sistema modifica las propiedades dinámicas de cada estructura, y ayuda en la reducción de las respuestas ante cargas dinámicas.

Se conectaron las estructuras y se estudiaron varios modelos de edificios acoplados con elementos pasivos. Se analizó la mejor ubicación y cantidad adecuada de los dispositivos de control, para lograr reducir las respuestas satisfactoriamente.

Asimismo, se utilizaron dispositivos de control pasivo, semiactivo y activo como elemento de conexión entre las estructuras, y se propusieron algoritmos de control para estos últimos.

Se analizaron varios modelos considerando variantes en el sistema de control, ubicación y cantidad de los dispositivos. Además, se analizaron los modelos para diferentes tipos de excitaciones, considerando los registros acelerométricos de “El Centro”, “Kobe” y “Taft”.

6.1.2 Análisis de resultados

Con los modelos simples de 2GDL, se pudo comprender los conceptos de estructuras acopladas, y los parámetros determinantes para que esta técnica sea aplicable en estructuras en escala real, como la razón de masas y/o frecuencias de ambos sistemas. En caso que las frecuencias de ambos edificios sean iguales, se observó que la capacidad de control disminuye considerablemente, lo que implica que es necesario tener dos estructuras disimilares para aplicar esta técnica.

Al considerar un amortiguador en la azotea de cada estructura (tres y nueve niveles), se observó cómo varían las propiedades dinámicas de cada edificio como: el incremento del porcentaje de amortiguamiento crítico, la reducción de respuestas R.M.S. en desplazamientos, velocidades y aceleraciones, y la variación de las formas modales. Cuando $c_d=0$, se consideró que los edificios están desacoplados y tienen un comportamiento individual. Por otro lado, cuando $c_d=60$ KN-seg/mm, se puede decir que el sistema está conectado mediante un elemento rígido. De este análisis se determinó un valor óptimo de c_d , que reduce las respuestas adecuadamente.

Una vez acopladas las estructuras, se realizaron variantes de ubicación y cantidad de los dispositivos de control. Se concluyó que la mejor alternativa es el uso de tres dispositivos en los tres primeros niveles de cada estructura. Sin embargo, cuando se considera un amortiguador en el tercer nivel, también se obtienen resultados equiparables con un tercio del costo del sistema de control.

Se implantaron dispositivos de control pasivos, semiactivos y activos, y se lograron reducir las respuestas de las estructuras, incrementar el amortiguamiento del sistema, disipar la energía producida por el sismo, reducir la cortante basal y distorsiones de entrepiso. Los sistemas activos tuvieron un mejor desempeño en la reducción de las respuestas en ambos edificios; mientras que los sistemas semiactivos tuvieron un comportamiento adecuado en el edificio 1 (tres niveles) pero relativamente bajo sobre el edificio 2 (nueve niveles). Los dispositivos pasivos ayudaron a mejorar las respuestas en el edificio 1, pero no ayudaron a mejorar las respuestas en el edificio 2. Esto debido a que los valores óptimos obtenidos en el capítulo 4, responden a una amplitud constante de ruido blanco, mientras que para una excitación aleatoria, como la de un sismo real, su comportamiento fue deficiente.

Cabe señalar que los sistemas semiactivos alcanzan su capacidad máxima (f_{max}) en ciertos puntos durante la simulación (Fig. 5.9 y 5.27-29), lo que demuestra que se podría incrementar hasta un 50% la intensidad de los sismos para utilizar los actuadores a su máxima capacidad. Esto da una pauta del margen confiabilidad que podrían tener estos sistemas ante eventos más grandes de los previstos.

6.2 CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

Se concluye que:

La técnica de acoplar estructuras resulta una alternativa viable para proteger las estructuras ante acciones dinámicas desfavorables como sismos.

La mejor configuración de los sistemas de control resulta en la utilización del máximo número posible de dispositivos acoplados entre cada estructura. En este estudio en particular, el uso de tres dispositivos aumenta las capacidades de control de ambas estructuras y la reducción de las respuestas.

La opción de colocar un dispositivo en la ubicación más alta posible, demostró una reducción de respuestas equiparable y un control de ambas estructuras adecuado. En este caso particular, el utilizar un dispositivo en el tercer nivel resulta una alternativa muy factible, considerando el elevado ahorro económico que implicaría utilizar un elemento en vez de tres.

Los sistemas activos resultan ser los más ventajosos para su utilización en estructuras acopladas; sin embargo, los limitantes tecnológicos, de confiabilidad y consumo de energía restringen su aplicación en estructuras reales.

Los sistemas semiactivos arrojan resultados favorables en las simulaciones, considerando los dispositivos existentes en actualidad. Su ahorro de energía, confiabilidad y su desempeño hacen de este sistema una alternativa muy atractiva, y que en años venideros probablemente tengan una gran aceptación en el campo de la ingeniería civil.

Recalcando lo mencionado por algunos investigadores de la referencia, el campo del diseño sismorresistente vuelca la mirada sobre esta alternativa de control, debido a que este sistema ofrece la confiabilidad de un sistema pasivo y un alto desempeño como un sistema activo. Por tanto, es necesario prestar atención a esta nueva tecnología que aún está en proceso de desarrollo.

Dentro de estudios futuros se pueden mencionar:

Ampliar el estudio a modelos en 3D. Será conveniente considerar modelos más semejantes a los reales y estudiar el comportamiento de sistemas acoplados en el espacio.

Es necesario profundizar los estudios considerando diferentes condiciones de sitio, acelerogramas de terrenos no convencionales (blandos, típicos de la ciudad de México) y/o de fuentes cercanas.

Realizar el modelado de estructuras con diferentes características dinámicas, que consideren interacción suelo estructura, sistemas estructurales y materiales de construcción no convencionales.

Proponer variantes a los sistemas de control acoplados, como TMD o Aisladores de base, que complementen la conexión entre estructuras y mejoren su comportamiento ante cargas sísmicas.

Realizar el estudio para diferentes algoritmos de control activos y semiactivos que a la fecha han tenido pocas aplicaciones en estructuras acopladas.

Estudiar diferentes dispositivos de control semiactivos como, amortiguadores con orificios variables, osciladores de masa inteligentes, amortiguadores de fricción variable, con fluidos controlables y otros; aplicados a estructuras acopladas.

Estudios relacionados con el tiempo de retraso (time delay) de los dispositivos.

Analizar las concentraciones de esfuerzos que se originan en los puntos de conexión de cada estructura, y realizar modelos analíticos que representen las elevadas fuerzas de control, y sus efectos sobre los elementos estructurales de ambos edificios.

Realizar análisis de tres o más estructuras acopladas que estén dispuestas en paralelo o en formación de triángulo o cuadrilátero Fig. 6.1.

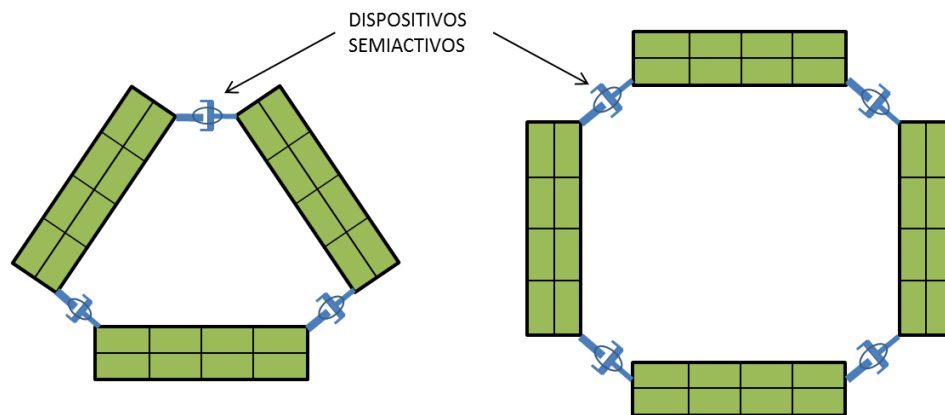


Fig. 6.1 - Variantes en la configuración de estructuras acopladas

También, la implantación de sistemas de control descentralizados en estructuras acopladas es un tópico que no ha sido estudiado aún, por lo que un trabajo futuro en esta dirección sin duda ampliaría el conocimiento de esta metodología.

REFERENCIAS

- Abe, M. y T. Igusa (1994). *"A rule-based feedforward control strategy with incomplete knowledge of disturbance."* First World Conference of Structural Control, TA 4.63-70.
- Akbay, Z. y H. M. Aktan (1991). *"Actively regulated friction slip devices."* 6th Conference on Earthquake Engineering in Canada, 367-374.
- Caughey, T. K. y M. P. Karyeaclis (1989). *"Stability of semi-active impact damper, Part I-Global behavior; Part II – Periodic solutions."* Journal Application Mechanics, 56(4), 926–940.
- Christenson, R. E. y B. F. Spencer (2001). *"Semiactive control of civil structures for natural hazard mitigation: analytical and experimental studies."* PHD dissertation, University of Notre Dame, Notre Dame – Indiana.
- Christenson, R. E., B. F. Spencer, N. Hori y K. Seto (2003). *"Coupled Building Control Using Acceleration Feedback."* Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 18(2003) 4–18.
- Christenson, R. E., B. F. Spencer Jr., E. A. Johnson y K. Seto (2006). *"Coupled Building Control Considering the Effects of Building/Connector Configuration."* Journal of structural engineering© ASCE, 10.1061/ASCE 0733-9445(2006) 132:6(853).
- Cimellaro, G. P. (2003). *"Coupled Building Control."* 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle – WA.
- Craig, R. y A. Kurdila (2006). *"Fundamentals of Structural Dynamics."* John Wiley & Sons Inc., Second Edition – Ney Jersey.
- Cundumi, S. O. (2005). *"A variable damping semiactive device for control of the seismic response of buildings."* PHD Dissertation, University of Puerto Rico, Mayagüez – Puerto Rico.
- Dyke, S. J., B. F. Spencer, M. K. Sain y J. D. Carlson (1996). *"Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction."* Smart Materials and Structures, vol. 5, pp. 565–575.
- Fahim, S. y B. Mohraz (1998). *"Variable Dampers for semi-active control of flexible structures."* 6th U.S. National Conference in Earthquake Engineering, June 1998, paper No 61.
- Fujimura, K., M. Sano, T. Watanabe y K. Seto (2004). *"Vibration Control of Flexible Structures Arranged in Parallel by Using Coupled Building Control Mechanism."* Journal Jido Seigyo Rengo Koenkai Koen Ronbunshu, Vol. 47th, Page Rombunno.111, code F0989C.
- Gawronski, W. K. *"Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures."* California Institute of Technology, Springer-Verlag Inc. 2004.

- Haramoto, H., K. Seto y Y. Koike (2000). "*Active Vibration Control of Triple Flexible Structures Arranged in Parallel.*" JSME International Journal, Series C, Vol. 43 No3, 2000.
- Housner, W., L. A. Bergman, T. K. Caughey, A. G. Chassiakos, R. O. Claus, S. F. Masri, R. E. Skelton, T. T. Soong, B. F. Spencer y J. T. P. Yao (1997). "*Structural Control: past, present, and future.*" Journal of engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9, ©ASCE, Paper No. 15617.
- Kannan, S., H. M. Uras y H. M. Aktan (1995). "*Active control of building seismic response by energy dissipation.*" Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24(5), 747 -759.
- Kobori, T., N. Koshika, N. Yamada y Y. Ikeda (1991). "*Seismic response controlled structure with active mass driver system. Part 1: Design.*" Earthquake Engineering Structural Dynamics, 20 133–139.
- Kurata, N., T. Kobori, M. Takahashi, N. Niwa y H. Midorikawa (1999). "*Actual seismic response controlled building with semi-active damper system.*" Earthquake Engineering and Structural Dynamics 28, 1427-1447 (1999).
- Kurino, H., J. Tagami, K. Shimizu y T. Kobori (2003). "*Switching Oil Damper with Built-in Controller for Structural Control.*" Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 7, ©ASCE.
- Kurino, H., Y. Matsunaga, T. Yamada y J. Tagami (2004). "*High performance passive hydraulic damper with semi-active characteristics.*" 13th world conference on earthquake engineering Vancouver - Canada, paper no. 33.
- Kwakernaak, H. y R. Sivan (1972). "*Linear Optimal Control Systems.*" Wiley, New York NY.
- Luco, E., y F. C. P. De Barros (1998). "*Optimal damping between two adjacent elastic structures.*" Earthquake Engineering and Structural Dynamics 27, 649-659 (1998).
- Lynch, J. P. (1998). "*Active Structural Control Research at Kajima Corporation.*" Summer Research Report at Kajima Corporation, Stanford University.
- Lynch, J. P., Y. Wang, R. A. Swartza, K. C. Lu y C. H. Loh (2005). "*Implementation of a closed-loop structural control system using wireless sensor networks.*" Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Makita, K., R. E. Christenson, K. Seto, y T. Watanabe (2007). "*Optimal Design Strategy of Connected Control Method for Two Dynamically Similar Structures.*" Journal of engineering mechanics ©ASCE, 0733-9399, pg. 1247-1257.
- Masri, S. (2000). "*An experimental study of an adaptive momentum exchange damper for structural control applications.*" 2nd European Conference on Structural Control, ENPC, Champs-sur-Marne, France.
- Matlab® 2009a. "*The Language of Technical Computing.*" Version 7.8.0.347, Copyright 1984 – 2009, The MathWorks Inc.
- Morales, F. E. (2007). "*Algoritmo de Control de Desplazamientos de Edificios Semiactivo de Manera Descentralizada.*" Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F.

Ohtory, Y., R. E. Christenson, B. F. Spencer Jr. y S. J. Dyke (2004). “*Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings.*” Journal of engineering mechanics ©ASCE, v130, 366(2004).

Preumont, A. “*Vibration Control of Active Structures.*” Université Libre de Bruxelles, Kluwer Academic Publishers, 2nd Edition, 2006.

Rai, D. C. (2000). “*Future trends in earthquake- resistant design of structures.*” Current Science Volume 79, No 9, Special Section: Seismology 2000.

Shimizu, K., S. Orui y H. Kurino (2004). “*Observed response of high-rise building with semi-active switching oil dampers to earthquake and typhoon.*” 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, 4WCSCM-214.

Soong, T. T. (1990). “*Active Structural Control: Theory and Practice.*” State University of New York Buffalo, John Wiley and Sons Inc. NY.

Soong, T. T., S. F. Masri, y G. W. Housner (1991). “*An Overview of Active Structural Control under Seismic Loads*”, ©Earthquake Spectra, Vol. 7, No. 3, 1991.

Spencer, B.F., y M. K. Sain (1997). “*Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback.*” Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, Vol. 17, No. 6, pp. 19–35, December 1997.

Spencer, B. F. y S. Nagarajaiah (2003). “*State of the Art of Structural Control.*” Journal of Structural Engineering ASCE©, pg. 845 – 856.

Tena-Colunga, A. (2007), “*State of the art and state of the practice for energy dissipation and seismic isolation of structures in México.*” 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy' Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Turkey 2007.

Tena, A. (2011). “*Curso de Sistemas de control de la Respuesta Sísmica*”, Universidad Autónoma Metropolitana, México D. F.

Uang, C. y V. Bertero (1988). “*Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake-Resistant Design.*” Report No UCB/EERC-88/18.

USGS (United States Geological Survey) - Earthquake Hazards Program, <http://www.usgs.gov/>

Varadarajan, N., y S. Nagarajaiah (2003). “*Wind response control of building with variable stiffness TMD: EMD/HT.*” Journal Engineering Mechanics, in press.

Watanabe, T., S. Fukuchi y K. Matsumaru (2010). “*Connected control method applied to ordinary and base isolated structures.*” 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, 5WCSCM-052.

Zhu, H., Y. Wen y H. Iemura (2001). “*A study on interaction control for seismic response of parallel structures.*” Computing Structures 79(2), pg. 231–242.

En el capítulo 4 se explica brevemente sobre la influencia de los eigenvalores imaginarios en las respuestas de una estructura. En el presente anexo se hace una explicación más profunda de este fenómeno.

Primero se parte de la ecuación 4.5, que representa la ecuación de un sistema con amortiguamiento:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t) \quad (4.5)$$

Si expresamos la ecuación de la siguiente manera:

$$\ddot{u} + \frac{C}{M}\dot{u} + \frac{K}{M}u = \frac{p(t)}{M} \quad (A.1)$$

considerando que:

$$\frac{C}{M} = \frac{\zeta(2M\omega_n)}{M} = 2\zeta\omega_n \quad \text{y} \quad \frac{K}{M} = \omega_n^2$$

Se tiene que A.1 puede ser redefinida como:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = \frac{p(t)}{M} \quad (\text{A.2})$$

que representa una ecuación diferencial de 2do orden lineal no-homogénea

Si se aplica la transformada de Laplace a la ecuación (A.2), se obtendrá una ecuación de 2do orden algebraica:

$$\bar{s}^2 + 2\zeta\omega_n\bar{s} + \omega_n^2 = \frac{p(t)}{M} \quad (\text{A.3})$$

La ecuación anterior es denominada *Ecuación Característica*, y su solución estará expresada por las siguientes raíces:

$$\left. \begin{matrix} \bar{s}_1 \\ \bar{s}_2 \end{matrix} \right\} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (\text{A.4})$$

Estas soluciones expresadas en el dominio de Laplace, sólo tendrían soluciones reales para sistemas sobre amortiguados ($\zeta > 1$), lo cual es poco posible para aplicaciones en ingeniería civil, por tanto las soluciones estarán expresadas con una componente compleja y se expresan de la siguiente manera:

$$\left. \begin{matrix} \bar{s}_1 \\ \bar{s}_2 \end{matrix} \right\} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}i = -\zeta\omega_n \pm i\omega_d \quad (\text{A.5})$$

Si se expresa la solución en coordenadas reales e imaginarias, se puede ver que la ubicación de los polos (raíces) relaciona la frecuencia natural de la estructura y el amortiguamiento modal.

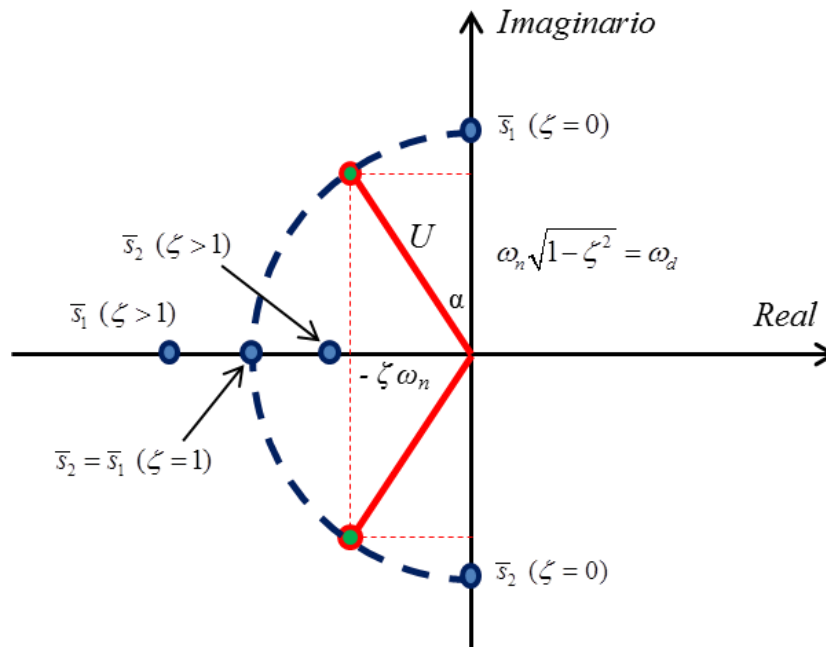


Fig. A.1 – Soluciones de la ecuación característica en el plano Real e Imaginario

De la figura anterior, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$U = \sqrt{(-\zeta\omega_n)^2 + (\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})^2} = \omega_n \quad (\text{A.6})$$

$$\text{sen } \alpha = \left(\frac{\zeta\omega_n}{U} \right) \rightarrow \alpha = \arcsen(\zeta) \quad (\text{A.7})$$

Donde U representa el valor de la amplitud de los polos y α el ángulo de inclinación.

La figura A.1 representa la ubicación polar de los modos de una estructura con amortiguamiento. El par complejo con su parte real es proporcional al amortiguamiento modal, donde la parte imaginaria es aproximadamente igual a la frecuencia natural n y el radio exactamente igual a la frecuencia natural.